

**Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**USO DE INDICADORES DE DESEMPENHO PARA
AVALIAR A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Clésio Leonel Hossa

**FLORIANÓPOLIS, SC
JULHO/2008**

**Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**USO DE INDICADORES DE DESEMPENHO PARA
AVALIAR A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Clésio Leonel Hossa

**Trabalho apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina para
Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**Orientador
Professor Dr. Peter Batista Cheung**

**FLORIANÓPOLIS, SC
JULHO/2008**


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

USO DE INDICADORES DE DESEMPENHO PARA
AVALIAR A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA

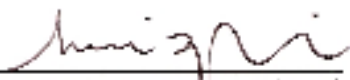
CLÉSIO LEONEL HOSSA

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para
Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental—
TCC II


BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Peter Batista Cheung
(Orientador)



Prof. Dr. Luiz Sérgio Philippi
(Membro da Banca)



Prof. Dr. Ramon Lucas Dalsasso
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)
JULHO/2008

*Aos meus pais, Pedro Paulo e Maria,
por todo apoio e incentivo aos estudos.*

I. AGRADECIMENTOS

À Deus, que permitiu trilhar os caminhos da vida com saúde.

Ao professor Peter Batista Cheung, pela orientação e amizade.

Ao Engenheiro Narumi Abe e ao Departamento de Hidráulica e Transportes do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, pela disponibilização dos dados dos sistemas de abastecimento.

À minha namorada, Camila Andrade, por toda sua paciência, compreensão e apoio, mesmo a distância.

Às minhas irmãs Ivone e Ivete, pelo apoio incondicional.

Aos meus grandes amigos, Ademir, Cliomar, Diego e Maico, que sempre foram os primeiros a entender a mão amiga em qualquer situação.

À todos demais colegas, funcionários e professores do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC.

II. RESUMO

A gestão ambiental integrada aos diversos processos e atividades desenvolvidas pela sociedade se tornou uma ferramenta indispensável à saúde econômica e ambiental das empresas. E no setor de saneamento básico, não é diferente, visto ser um setor de grande impacto aos recursos naturais, principalmente ao componente água, seja no seu uso direto, ou como fonte de energia elétrica. No que se refere aos sistemas de abastecimento de água, os mesmos são responsáveis por boa parte da água consumida, assim como pelo consumo energético. No entanto este consumo é representado em boa parte pelas perdas de água nos sistemas de abastecimento, que no Brasil chegam a 41,5%. Além disso, a ineficiência energética traz perdas econômicas importantes às concessionárias, comprometendo por vezes sua sustentabilidade. O trabalho apresentado tem por objetivos avaliar os indicadores de eficiência energética propostos na literatura, verificando seu desempenho em dois sistemas de abastecimento (bairro Coopha e bairro Nova Lima), ambos localizados em Campo Grande, MS, bem como a evolução destes indicadores em cenários de perdas. Estes dois sistemas foram modelados e simulados no software EPANET 2 (ROSSMAN, 2000).

A metodologia aplicada baseia-se na comparação da energia fornecida aos sistemas, a energia mínima requerida para suprir a vazão e pressão requeridas nos nós e a diferença destas duas variáveis, resultando na energia em excesso no sistema.

Verifica-se que os indicadores E1, E2 e E3 são apropriados para avaliar e comparar a eficiência energética tanto entre cenários quanto entre sistemas, mostrando que o sistema A é energeticamente mais eficiente do que o sistema B. Já o indicador proposto E4 mostra restrições quanto a sua aplicabilidade, não sendo possível seu uso para comparar sistemas. No entanto é apropriado para comparar cenários e a influência de medidas de controle das perdas reais. Outras medidas de controle que proporcionam melhoria na eficiência energética não são contempladas por este indicador.

Palavras-chave: Sistema de Abastecimento de Água, Modelagem Matemática, Indicadores de Eficiência Energética

III. ABSTRACT

The integrated environmental management with several process and activities developed by the society, it has become an indispensable tool for the company's economic and environmental health. Considering the sector of sanitation, it is not different. This is a sector that has a high impact to the natural resources, mainly to the component water, either in its direct use, or as electric power source. With reference to water distribution systems, they're responsible for an important amount of the consumed water, as well as for the energy consumption. However, this consumption is represented in a large part for the losses of water in the supply systems, which in Brazil arrive to 41.5%. Beyond that, the energy inefficiency brings important economic losses to the water utilities, sometimes compromising its sustainability. The present work focuses on energy efficiency assessment whit indicators available in the literature, verifying its performance in two systems (Coopha and Nova Lima) situated in Campo Grande city, MS, and checking the water losses influence in this indicator. These two real supply systems shaped and simulated in the software EPANET 2 (ROSSMAN, 2000).

The methodology adopted compare the gave and required energy in the systems, to satisfy the flow and pressure required in each of nodes. The difference between them results in a excess energy in the systems.

It was verified that the indicators E1, E2 and E3 are suitable to evaluate and compare the energetic efficiency between sceneries and systems, showing that system A is energetically more efficient that system B. The proposed indicator E4, showed some restrictions for its applicability, not being possible its use to compare systems. However, it's appropriate to compare sceneries and the influence of control measures of the real losses. Others control measures that provide improvements in the energy efficiency aren't contemplated in this indicator.

Keywords: Water Supply System, Mathematical Modeling, Energy Efficiency Indicator.

IV. SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	<i>OBJETIVOS GERAIS</i>	3
2.2	<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	3
3	JUSTIFICATIVA	4
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
4.1	<i>SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO BRASIL</i>	5
4.2	<i>PERDAS NOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA</i>	5
4.2.1	<i>PERDA DE ÁGUA TOTAL</i>	5
4.3	<i>MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL</i>	9
4.4	<i>SETOR ENERGÉTICO NO BRASIL</i>	11
4.4.1	<i>ESTRUTURA TARIFÁRIA NO BRASIL</i>	11
4.5	<i>EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO</i>	16
4.5.1	<i>E1 - ENERGIA EM EXCESSO POR VOLUME DE ÁGUA ENTRADA NO SISTEMA</i>	22
4.5.2	<i>E2 - ENERGIA EM EXCESSO POR VOLUME DE ÁGUA FATURADA</i>	22
4.5.3	<i>E3 - ECONOMIA DE ENERGIA EM EXCESSO</i>	23
4.5.4	<i>E4 - ENERGIA EM EXCESSO POR VOLUME DE ÁGUA PERDIDA REAL</i>	23
5	METODOLOGIA	24
6	RESULTADOS	27
6.1	<i>DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS REAIS</i>	27
6.2	<i>FORMULAÇÃO DOS CENÁRIOS</i>	29
6.3	<i>VOLUMES FORNECIDOS</i>	32
6.4	<i>VOLUMES MICROMEDIDOS</i>	32
6.5	<i>PERDAS TOTAIS</i>	33
6.6	<i>PERDAS REAIS E APARENTES</i>	33
6.7	<i>CÁLCULO DOS ÍNDICADORES DE DESEMPENHO ENERGÉTICO</i>	35
7	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	37
8	BIBLIOGRAFIA	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curvas de Carga Mensal dos Sistemas Elétricos no Brasil. Fonte: ONS, ano base 2007	13
Figura 2. Curvas de Carga Mensal no Sistema Elétrico Nacional. Fonte: ONS, 2008.....	13
Figura 3. Variação do Volume Útil do Reservatório de Marimbondo. Fonte: ONS, 2008.....	14
Figura 4. Custos de exploração da água para abastecimento. Fonte: SNIS (2006)	17
Figura 5. Representação dos vários tipos de potência num sistema de abastecimento de água. Fonte. DUARTE <i>et al</i> (2008)	20
Figura 6. Padrão de consumo do Sistema A	28
Figura 7. Padrão de Consumo do Sistema B	29
Figura 8. Zerando o CE dos nós do sistema	29
Figura 9. Curva das Perdas Totais x CE	31
Figura 10. Aumento linear da potência fornecida.....	37
Figura 11. Aumento linear do indicador E1 em função das perdas totais	38
Figura 12. Aumento do indicador E2 com o aumento das perdas totais	39
Figura 13. Evolução do indicador E3 com o aumento das perdas	39
Figura 14. Evolução do Indicador E4 com aumento das perdas reais	40
Figura 15. Economia pecuniária em cada cenário	41

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Componente do balanço de águas em um sistema de abastecimento	6
Tabela 2. Perdas de faturamento nos Sistemas de Abastecimento por regiões.	9
Tabela 3. Parque gerador existente em dezembro/2005 no Brasil (MW).....	11
Tabela 4. Estrutura Tarifária da Energia Elétrica no Brasil.....	15
Tabela 5. Tarifas Médias por Classe de Consumo Regional e Brasil (R\$ / MWh)	15
Tabela 6. Objetivos estratégicos, critérios de avaliação e indicadores de eficiência.....	19
Tabela 7. Valores de entrada para o cálculo dos índices	24
Tabela 8. Síntese dos sistemas em estudo.....	27
Tabela 9. Declividade média dos sistemas A e B	28
Tabela 10: Valores de CE utilizados na obtenção da curva e CE adotados.....	30
Tabela 11. Volume fornecido aos Sistemas simulados.....	32
Tabela 12. Volumes micromedidos	33
Tabela 13. Perdas totais	33
Tabela 14. Planilha de cálculo das perdas reais no Sistema A	34
Tabela 15. Identificação dos nós e respectivos CE.....	35
Tabela 16. Perdas reais e aparentes	35
Tabela 17. Resultados finais dos indicadores	36
Tabela 18. Cenários e as potências correspondentes.	37

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Sistema A	44
Anexo 2. Sistema B	45
Anexo 3. Perfil topográfico do sistema de abastecimento de água A.....	46
Anexo 4. Perfil topográfico do sistema de abastecimento de água B.....	47

1 INTRODUÇÃO

A natureza foi, e por muitos ainda continua sendo, considerada uma fonte inesgotável de recursos. O extrativismo, utilizando-se de ferramentas destrutivas, foi o responsável por degradar imensas áreas, suprimindo vegetações nativas sem nenhuma preocupação com a cobertura restante, trazendo um processo erosivo agressivo, poluindo rios, deixando imensa dívida com a natureza.

No entanto a preocupação da comunidade internacional com os limites desenvolvimentistas do planeta despertou movimentos sociais que passaram a questionar este tipo de desenvolvimento. Tais movimentos datam da década de 60, quando ganharam tamanha representatividade que levaram a ONU a promover uma Conferência sobre o Meio Ambiente em Estocolmo (1972).

Em 1987 foi apresentado o documento *Our Common Future* (Nosso Futuro Comum) que ficou conhecido como o relatório Brundtland pelo fato da Comissão Mundial da ONU sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED) ter sido presidida por Gro Harlem Brundtland e Mansour Khalid, onde diz que desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as futuras gerações satisfazerem suas próprias necessidades.

O Relatório da Comissão Brundtland cita ainda uma série de medidas a serem tomadas pelos países para promover o desenvolvimento sustentável. Entre elas estão a garantia de recursos básicos (água, alimentos, energia) em longo prazo, a preservação da biodiversidade e dos ecossistemas e a diminuição do consumo de energia e desenvolvimento de tecnologias com uso de fontes energéticas renováveis. Mas este conceito ainda está distante de ser realidade, principalmente no que diz respeito ao uso racional da água e o consumo energético.

A escassez de mananciais de boa qualidade já é uma realidade no Brasil, embora tenhamos uma disponibilidade hídrica *per capita* de 48.314 m³ (WWAP/Unesco). Este fato é devido à poluição que ocorre nas áreas próximas aos grandes centros urbanos, onde justamente há maior demanda de água.

Esta situação por si só mostra o contra-senso, alavancando a distância entre conceito de sustentabilidade e a prática. A noção de gestão ambiental estaria resolvendo o problema na origem, evitando a poluição, e não no final do processo, onde o poder público gasta quantias pecuniárias consideráveis, seja no tratamento das águas para garantir o padrão de potabilidade para consumo, ou quando se torna necessário buscar a mesma em locais afastados, onerando ainda mais o processo, agora com gastos energéticos e de estrutura.

Mas o problema não pára por aí. Desta água que é produzida, um montante de 41,5% do total é perdido, conforme mostram os dados do Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento. Ou seja, as prestadoras do serviço não recebem o pagamento pelo serviço para disponibilizar este percentual. Mas alguém terá que pagar a conta.

SOARES (2007) afirma que “A ocorrência de elevados indicadores de perdas por vazamento em sistemas de abastecimento de água é freqüentemente ligado às inúmeras quebras de tubulações originadas em decorrência de elevados níveis de pressões atuantes”. COLOMBO (2007), considerando a não existência de sistemas estanques destaca a necessidade de reduzir as perdas por vazamentos, atuando justamente no

controle das altas pressões, onde as concessionárias têm atuado, empregando válvulas redutoras de pressão (VRP), visando o rebaixamento do plano piezométrico das redes durante os períodos de menor consumo onde as pressões são excessivas, aumentando as perdas por vazamentos. Para ele, embora as concessionárias tenham obtidos bons resultados, estes poderiam ser alavancados se as VRP fossem devidamente ajustadas e localizadas.

No entanto se existe pressão em excesso devido a elevada cota piezométrica dos reservatórios, pode-se questionar a eficiência energética do sistema, visto que foi gasto energia elétrica para recalcar a água até os reservatórios, e agora esta energia estaria sendo dissipada utilizando as válvulas redutoras de pressão.

E qual a quantidade de energia em excesso em determinado sistema onde é necessário o uso de válvulas para reduzir a pressão? Será que o reservatório não poderia estar posicionado em uma cota inferior, garantindo a pressão mínima de 10 m.c.a. exigidas por norma e ao mesmo tempo exigindo menos energia para ser recalcada?

Estas são algumas das questões que serão discutidas ao longo deste trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Avaliar a eficiência energética de dois sistemas de água de dois bairros da cidade de Campo Grande e os respectivos indicadores para a situação real e outros cenários, verificando a aplicabilidade dos mesmos como indicadores comparativos entre cenários bem como entre sistemas de abastecimento, para efeitos de avaliação da eficiência energética.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Quantificar as perdas dos sistemas Coopha e Nova Lima, bairros de Campo Grande, e avaliar a eficiência energética;
- b) Simular cenário hipotético com perdas reais nulas e verificar os novos indicadores de eficiência energética.
- c) Simular cenário com perdas totais na ordem de 25, 50 e 75% e verificar os indicadores de eficiência energética gerados;
- e) Determinar os indicadores de eficiência energética em outro sistema de abastecimento de água e comparar os indicadores, verificando assim qual é o sistema com melhor eficiência energética;
- f) Fazer um balanço econômico dos sistemas atuais e apresentar soluções alternativas, justificadas tecnológica e financeiramente.

3 JUSTIFICATIVA

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS (2006), os gastos com energia elétrica representam 15,8% do total dos gastos com exploração da água, sendo que 92,7% desta energia é gasta com os sistemas de abastecimento de água e o restante é consumido nos sistemas de esgoto.

Os dados do SNIS (2006) ainda mostram que do total de água produzida para o abastecimento, houve uma perda de faturamento de 41,5%. Ou seja, considerando uma situação hipotética de perdas nulas, e considerando ainda que o gasto energético em sistemas de abastecimento está diretamente relacionado ao volume disponibilizado (produzido), há uma perda de R\$ 721.979.593,00 por ano somente com energia elétrica.

Por isso, os sistemas de abastecimento de água devem ser estudados de modo a avaliar sua eficiência energética, produzindo indicadores que sirvam de parâmetro de avaliação desta eficiência e possam sugerir alternativas de melhorias, alavancando a eficiência e trazendo por consequência maior sustentabilidade aos mesmos e contribuir com a conservação dos recursos naturais e financeiros.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Sistemas de Abastecimento de Água no Brasil

Em 2000, segundo os dados do Censo do IBGE, 10% dos domicílios brasileiros em áreas urbanas (que equivalem a 3,9 milhões de famílias ou 14,4 milhões de pessoas) não eram servidos por rede de abastecimento de água. A maioria destes domicílios, no entanto, conta com água encanada originária de outras fontes, tais como nascentes e poços. E grande parte dessa população mora em áreas periurbanas – que são as vizinhanças imediatas das cidades - e ainda contam com fontes com razoável qualidade, mas que apresentam tendências de degradação em função da expansão urbana sobre essas áreas, sem os devidos cuidados com os serviços de saneamento, como redes de esgoto.

Em áreas rurais, a situação é bastante diferenciada, sendo que 43% dos domicílios rurais não dispõem de nenhum tipo de água encanada e apenas 18% dos domicílios rurais estão ligados à rede de abastecimento.

Segundo o SNIS (2006), a perda de faturamento nos sistemas públicos de abastecimento foi de 41,5%. Para a redução dessas perdas são necessários programas que envolvam fiscalização de ligações clandestinas, substituição de redes danificadas, manutenção de hidrômetros, pesquisas de vazamento, entre outros procedimentos. Além das medidas estruturais para minimizar as perdas nas redes, é necessário a fiscalização de usos e da ocupação nas áreas de mananciais, de forma a evitar a degradação das fontes de água, juntamente com campanhas de esclarecimento da população sobre o adequado uso deste importante recurso natural.

4.2 Perdas nos Sistemas de Abastecimento de Água

ALEGRE *et al.* (2000) citado por ITONAGA (2005), buscando uma uniformização da nomenclatura, propôs a Tabela 1, com os componentes do balanço de águas em um sistema de abastecimento com as terminologias relacionadas ao tema.

4.2.1 Perda de Água Total

A perda de água total se refere à diferença entre a quantidade de água produzida e a quantidade que é consumida. Esta perda pode ser decomposta em duas, que são as perdas reais e as perdas aparentes.

Tabela 1. Componente do balanço de águas em um sistema de abastecimento

Entrada no Sistema	Consumo Autorizado	Consumo Faturado	Consumo Medido (Incluindo Água Exportada)	Água Faturada
			Consumo Não Medido	
	Perdas de Água	Consumo Não Faturado	Consumo Medido	Água Não Faturada
			Consumo Não Medido	
		Perdas Aparentes	Uso Não Autorizado	
			Erros de Medição	
		Perdas Reais	Perdas nas tubulações de água bruta e no tratamento (quando houver)	
			Vazamentos nas tubulações de adução e/ou distribuição	
			Vazamentos e extravasamentos nos reservatórios de adução e/ou distribuição	
			Vazamentos nos ramais (a montante do hidrômetro)	

4.2.1.1 Perdas Reais e suas Causas

Considera-se como perda real toda a água que é subtraída do sistema e que não é consumida pelo cliente final. Segundo o Documento Técnico de Apoio A2 do PNCDA, em um sistema de abastecimento de água as perdas reais totais são as perdas de água que ocorrem entre a captação de água bruta e o cavalete do consumidor. Estas incluem as perdas na captação e adução de água bruta, no tratamento, nos reservatórios, nas adutoras, subadutoras de água tratada e instalações de recalque, e nas redes de distribuição e ramais prediais, até o cavalete.

Esse tipo de perda ocorre por vazamentos em tubulações, equipamentos e estruturas, por extravasamento de reservatórios e canais, água utilizada em processos operacionais de lavagem de filtros e limpeza de decantadores e descargas em redes de adução e distribuição.

Essas perdas podem ser significativas e podem ficar ocultas por meses ou mesmo anos. As maiores perdas ocorrem em rompimento de tubulações, ou de rupturas repentinas em nós, ao passo que pequenas perdas se originam de corrosão do material da tubulação e de aberturas nos elementos que compõem os nós e as conexões.

O volume perdido depende substancialmente da pressão no sistema e do tempo de vazamento, isto é, do tempo desde que o vazamento se inicia até sua correção. Isso, por sua vez, depende da facilidade de localização do vazamento a partir da superfície do solo.

4.2.1.2 Perdas Aparentes e suas Causas

As perdas aparentes apresentam um leque de variação amplo, considerado o conceito de águas produzidas e consumidas, porém não revertidas em faturamento, englobando, inclusive, os erros de macromedição que geram outro tipo de problema que são as águas não produzidas, mas computadas como tal. O Documento Técnico de Apoio C3 do PNCDA, traz os seguintes conceitos referentes às perdas aparentes e suas causas:

a) Uso Não Autorizado

A intensidade da prática de fraudes e sua importância no volume total de águas não faturadas é função do controle e das medidas de repressão adotadas pela entidade operadora do sistema. Os principais tipos de fraudes são os seguintes:

- colocação de agulhas e pregos na relojoaria do hidrômetro, travas na turbina ou avarias diversas;
- tubulação em paralelo ao cavalete (*by pass*);
- hidrômetro invertido ou inversão do fluxo no hidrômetro por sistema de tubulação e registros;
- ligação clandestina.

b) Ausência de micromedição

A ausência de micromedição é um dos principais indutores de perdas aparentes sendo, porém, negligenciada por alguns operadores. A experiência internacional e de algumas cidades brasileiras leva a concluir que o consumo em áreas com ligações não medidas fica limitado à capacidade de suprimento do sistema, pois o usuário não tem motivos para economizar água ou evitar desperdícios através da substituição de bóias ou torneiras defeituosas ou do reparo de vazamentos em tubulações.

c) Erros de Micromedição

O sistema de micromedição apresenta os seguintes fatores indutores de perdas aparentes:

- perdas inerentes do sistema (ou incompressíveis);
- hidrômetros inclinados;
- hidrômetros com problemas diversos;
- hidrômetros mal dimensionados.

As perdas inerentes ao sistema de micromedição compreendem aquelas impossíveis de serem eliminadas e, por isso são denominadas de incompressíveis. A existência de caixa d'água e bóia nas residências faz com que ocorra uma submedição na fase final de enchimento, quando a vazão situa-se aquém da vazão de transição do medidor. Além desse fato, o próprio hidrômetro, mesmo que bem dimensionado e calibrado, apresentará sempre um percentual de erro menor do que os volumes efetivamente fornecidos.

A existência de inclinação do hidrômetro com relação ao seu eixo induz à submedição dos volumes fornecidos em percentuais variáveis em função das características do medidor e do ângulo de inclinação.

A inclinação do hidrômetro ocorre por falha de instalação ou, usualmente, pelo próprio leitorista ou pelo cliente visando facilitar a leitura. Um motivo importante de erros na medição refere-se aos hidrômetros com problemas diversos, entre eles destacam-se: hidrômetros parados, com a cúpula riscada ou opaca (o que induz a erros de leitura) e medidores com o tempo de instalação vencido levando a submedições superiores às normais.

Finalmente, salienta-se que as perdas aparentes representadas pela submedição de hidrômetros mal dimensionados para as vazões fornecidas, principalmente aqueles com capacidade superior aos volumes medidos, que já na sua instalação apresentam um custo adicional desnecessário e durante sua vida operacional, por seu superdimensionamento, induzirão a perdas de faturamento.

d) Gerenciamento ineficiente de consumidores

O gerenciamento de consumidores (ou gestão de clientela) quando praticado de forma ineficiente é um dos importantes indutores de perdas aparentes, merecendo especial destaque os seguintes tópicos:

- controle de consumidores no campo e no escritório;
- política de gestão de consumidores típicos;
- sistema de leitura;
- gestão do parque de hidrômetros instalados;
- gestão de grandes consumidores;
- cadastro de consumidores;
- sistema informatizado utilizado; e
- consolidação e apresentação dos resultados.

A entidade operadora deverá efetuar um efetivo gerenciamento de consumidores a ser praticado no campo e no escritório, tratando de acompanhar efetivamente e explicar variações de consumo de consumidores típicos. Ênfase especial deve ser dada aos grandes consumidores: lava-rápidos, lavanderias e tinturarias, indústrias de bebidas, motéis e outros onde a água seja insumo fundamental.

Tais ações devem ser elaboradas com políticas de controle geral dos consumidores, a exemplo de vistorias periódicas de ligações suprimidas e inativas ou ligações com consumo zero ou próximo dele, vistoria sistemática de grandes consumidores, controle de consumo de prédios públicos e próprios e afins.

O consumo de zonas carentes sujeitas a abastecimento irregular ou sujeitas a política de cobrança diferenciada deverá ser mantido sob controle, mediante macromedição distrital. Em função do perfil de urbanização da comunidade servida deverá ser aplicada uma política própria de gestão de grandes consumidores, pois em alguns casos chegam a representar consumo próximo da metade do consumo total da comunidade. Outra questão a considerar refere-se àqueles grandes consumidores que dispõem de fonte própria de abastecimento, cuja medição é necessária para fins de cobrança de tarifa de coleta do esgoto gerado.

O cadastro de consumidores deverá ser constantemente atualizado, em função do desenvolvimento urbano da comunidade servida, devendo traduzir fielmente o que efetivamente ocorre no campo. O sistema informatizado de gestão comercial deverá providenciar, além das funções diretas, estatísticas do padrão de consumo, como segue:

- distribuição do volume micromedido por faixas de consumo (histogramas);
- estatística e listagem das ligações com consumo zero;
- estatística e listagem das ligações com variação significativa;
- estatística de consumo de consumidores típicos pré-estabelecidos; e
- capacidade e tempo de instalação de medidores.

No Brasil as perdas com faturamento nos sistemas de abastecimento são elevadas, conforme mostra a Tabela 2.

MIRANDA (2002) comenta que a redução de perdas possibilitaria o melhor aproveitamento da infra-estrutura existente, não sendo necessária a aplicação de recursos para ampliação dos sistemas para suprir tais perdas. Outro aspecto positivo referido por Miranda seria o aumento do faturamento: para um total de R\$ 11,7 bilhões faturados pelos serviços de abastecimento de água em 2006 (SNIS, 2006), 20% correspondem a R\$ 2,35 bilhões, que representaria o incremento da receita caso as perdas fossem reduzidas nesse percentual e os volumes recuperados convertidos em faturamento.

Tabela 2. Perdas de faturamento nos Sistemas de Abastecimento por regiões.

Região	Consumido (1000m³/ano)	Faturado (1000m³/ano)	Perda de Faturamento (%)
Norte	407.487	185.885	54.4
Nordeste	2.492.984	1.337.996	46.3
Sudeste	5.786.289	3.337.190	42.3
Sul	1.328.017	954.998	28.1
Centro-Oeste	603.693	400.551	33.6
TOTAL	10.618.469	6.216.620	41.5

Fonte: Sistema Nacional de Informações do Saneamento (2006).

Segundo GUMIER (2006) a redução dos indicadores de perdas deve ser o principal desafio das companhias de saneamento, uma vez que sistemas de abastecimento que não operam com um bom nível de eficiência implicam além da captação de um volume hídrico acima do previsto inicialmente, o conseqüente aumento no consumo de energia elétrica pelos componentes de bombeamento e ainda custos adicionais em insumos e mão de obra para operação do sistema.

A redução da perda de água nestes sistemas conduz a um maior equilíbrio financeiro para companhia de saneamento, além de adiar ou mesmo evitar a necessidade de expansão da produção de água e os altos investimentos inerentes à execução de novas captações, estações de tratamento e adutoras para transporte da água localizadas, na maioria das vezes, distantes dos centros de consumo.

4.3 Modelagem e Simulação Computacional

Ainda segundo GUMIER (2006) os modelos computacionais de simulação hidráulica de sistemas de abastecimento são ferramentas cujo objetivo é reproduzir, através de um equacionamento matemático, com maior exatidão possível, o comportamento real do sistema físico que representa.

A este equacionamento matemático é associado um método numérico de solução e então transformados em uma sequência ordenada de comandos. Não é necessário que o modelo reproduza todos os componentes físicos do sistema, mas talvez somente aqueles significativos, dependendo da confiabilidade exigida e do uso a que se destina o modelo.

Na prática, a modelação de uma rede se reduz ao estudo de um esquema simplificado da mesma, a cujas tubulações se associam os parâmetros adequados para reproduzir, o mais fielmente possível, seu comportamento efetivo.

Com o intuito de apresentar o cenário atual e criar outros, de forma a propiciar condições para que sejam avaliados os indicadores propostos neste trabalho e suas variações em diferentes cenários e sistemas, serão desenvolvidas simulações utilizando o software EPANET 2 (ROSSMAN (2000)) que é um sistema computacional de

domínio público, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency – EPA) que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água de sistemas de distribuição em pressão.

HERPETZ (2003) citado por GUMIER (2006) apresenta sua concepção metodológica para realização dos serviços de investigação de vazamentos em campo dividindo os trabalhos em três etapas:

- levantamento da área
- pré-localização e
- detecção do vazamento.

O levantamento da área é uma primeira investigação da rede de distribuição, sendo realizada através de medição das vazões para avaliação das perdas do setor. Revelados indícios de grande volume de perdas no setor iniciam-se os trabalhos referentes à etapa seguinte de pré-localização da fuga, através da procura das regiões suspeitas de conter fugas. A busca destas regiões pode ser realizada de duas diferentes maneiras: com equipamentos que coletam e armazenam ruídos ao longo de um período (data-loggers) ou através da simulação hidráulica da rede por modelagem computacional.

A detecção de vazamentos, terceira etapa da realização dos trabalhos, é a localização exata do local do vazamento, com auxílio dos aparelhos acústicos de geofone. Desta forma, o trabalho mais árduo, lento e minucioso – que é o de caminhar sobre a linha, posicionar o aparelho a cada metro e avaliar as leituras apontadas – fica resumido apenas aos trechos suspeitos, não necessitando mais ser aplicado em toda a extensão de rede existente.

A simulação hidráulica da rede por modelagem computacional pode se agregar a esta metodologia na fase de pré-localização da fuga, ou mesmo na fase seguinte de localização da fuga, necessitando para tanto apenas do aperfeiçoamento dos modelos existentes.

ITONAGA (2005) utilizando a modelagem hidráulica das redes com o intuito de simular a operação dos sistemas com vazamentos e extrair informações que podem ser úteis nos procedimentos de controle de perdas, propõem as seguintes etapas:

a) Construção dos modelos hidráulicos- Nesta etapa devem ser inseridas todas as informações a respeito do sistema, como topografia, demandas, diâmetros, nós, etc.

b) Calibração dos modelos hidráulicos- As variáveis de um processo de calibração de modelos de redes necessariamente envolvem os parâmetros do modelo de vazamento, a rugosidade da tubulação e, eventualmente, o diâmetro. O modelo de vazamento no EPANET é simulado por um orifício associado ao nó da rede a partir de uma fórmula do tipo:

$$q_i = CE_i * P_i^y \quad \text{Equação 1}$$

Onde q_i é o vazamento associado ao nó i da rede; CE_i é o coeficiente do emissor no nó i ; P_i é a pressão no nó i da rede; e y é o expoente do modelo.

ITONAGA (2005) ainda propõem que a vazão de entrada do sistema seja tomada como a média de um período considerável, quando disponível. A calibração, então, consiste no ajuste das vazões horárias simuladas na entrada dos sistemas com os dados

observados a partir da determinação dos parâmetros de vazamento CE e y e da variação horária, compatibilizando com o índice de perdas medido pelo monitoramento da vazão mínima noturna. E, em seguida, o ajuste das pressões simuladas e observadas com a variação da rugosidade e da carga hidráulica inicial, sempre de forma iterativa, com auxílio do relatório de calibração do EPANET.

c) Aplicação no controle de perdas

GONÇALVES (1998) citado por ITONAGA (2005) cita as válvulas redutoras de pressão ou reservatórios de quebra-de-pressão como os dispositivos mais utilizados para a redução de pressão em sistemas de abastecimento.

O problema de localização da válvula reguladora de pressão é bastante simplificado com o uso de modelos hidráulicos por permitir a visualização das pressões nos diversos pontos do sistema. Com o modelo recebendo calibração da variação horária de consumo é possível distinguir as pressões críticas (máxima e mínima) ao longo do dia. Assim, por tentativa e erro, chega-se à situação adequada para o sistema.

O EPANET apresenta facilidades de visualização das vazões por trecho permitindo melhor compreensão dos caminhos preferenciais e auxiliando na decisão do projetista.

4.4 Setor Energético no Brasil

O Brasil atingiu ao final do ano de 2005, uma capacidade instalada de geração de energia elétrica de 100,5 mil megawatts (MW) como mostrado na Tabela 3.

No entanto a potência nominal instalada não corresponde à efetiva capacidade de geração do País. Isso porque, para gerar energia, as usinas termoeletricas precisam de combustível - gás ou óleo, por exemplo - e as hidrelétricas dependem do nível de água nos reservatórios. Ou seja, cada usina tem uma capacidade real de gerar energia inferior ao que, nominalmente, suas máquinas permitem.

Tabela 3. Parque gerador existente em dezembro/2005 no Brasil (MW)

Fonte	Capacidade Instalada (MW)	%
Hidrelétrica	69.631	69.3
Termelétrica	19.770	19.7
Nuclear	2.007	2.0
PCH	1.330	1.3
Subtotal	92.738	92.3
Interligação com a Argentina	2.178	2.2
Parcela de Itaipu da ANDE	5.600	5.6
TOTAL	100.516	100.0

Fonte: BIG – Banco de Informações da ANEEL, 30/01/2006.

4.4.1 Estrutura Tarifária no Brasil

Até 1981, a energia era distribuída utilizando a estrutura tarifária convencional, caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano, o que não permitia que o consumidor percebesse os reflexos decorrentes da forma de utilizar a eletricidade, já que não havia diferenciação de preços.

As tarifas de eletricidade em vigor possuem estrutura horo-sazonal, caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de

potência de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano, conforme especificação a seguir (Resolução ANEEL 456/00):

Tarifa Azul: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia.

Tarifa Verde: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de uma única tarifa de demanda de potência.

A mesma resolução ainda define:

Horário de ponta (P): período definido pela concessionária e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, “Corpus Christi”, dia de finados e os demais feriados definidos por lei federal, considerando as características do seu sistema elétrico.

Horário fora de ponta (F): período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta.

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, a curva de carga horária apresenta uma intensificação do uso da eletricidade no horário das 17 às 22 horas. Esse comportamento resulta das influências individuais das várias classes de consumo que normalmente compõem o mercado: industrial, comercial, residencial, iluminação pública, rural e outras.

Este horário de maior uso é denominado "horário de ponta" do sistema elétrico, e é justamente o período em que as redes de distribuição assumem maior carga, atingindo seu valor máximo entre as 18 e 20 horas, variando um pouco este horário de região para região do país.

Devido ao maior carregamento das redes de distribuição neste horário, verifica-se que um novo consumidor a ser atendido pelo sistema custará mais à concessionária nesse período de maior solicitação do que em qualquer outro horário do dia, tendo em conta a necessidade de ampliação do sistema para atender ao horário de ponta.

Da mesma forma, o comportamento do mercado de eletricidade ao longo do ano tem características próprias, que podem ser visualizadas na Figura 1, que apresenta a variação das Cargas de energia ao longo do ano de 2007 no Sistema Nacional e nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, Sul, Nordeste e Norte.

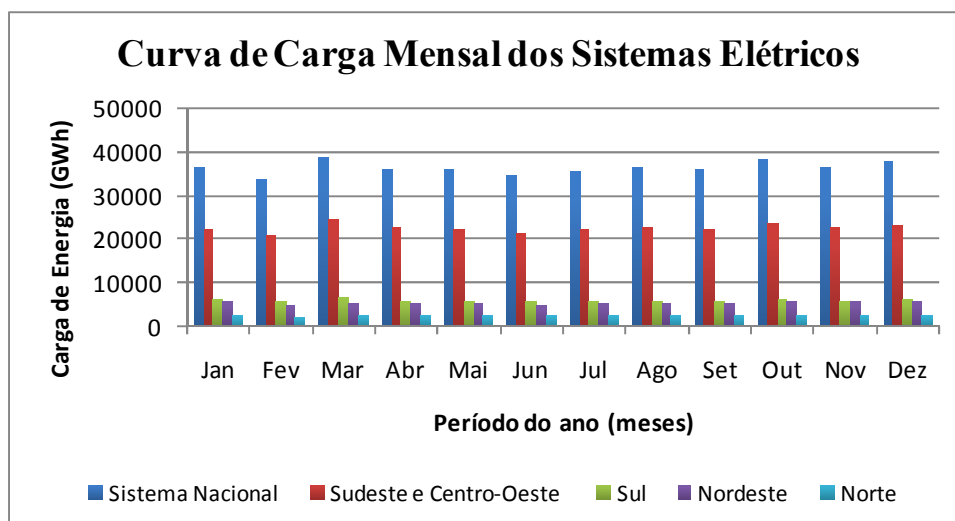


Figura 1. Curvas de Carga Mensal dos Sistemas Elétricos no Brasil. Fonte: ONS, ano base 2007

Já a Figura 2 representa o comportamento médio do mercado de energia elétrica a nível nacional, para quatro anos consecutivos (2003 a 2006).

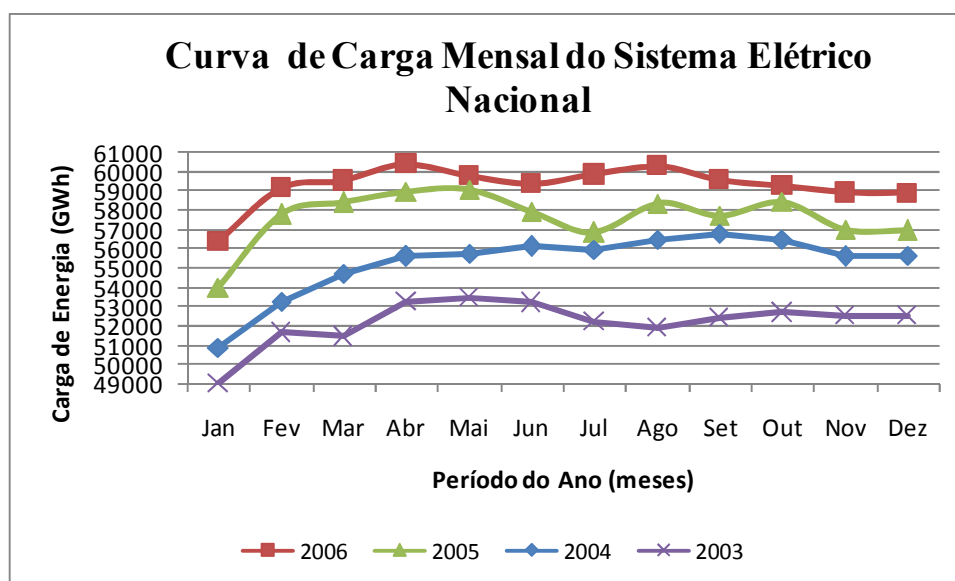


Figura 2. Curvas de Carga Mensal no Sistema Elétrico Nacional. Fonte: ONS, 2008.

A Figura 3 representa a disponibilidade média de água no reservatório de Morimondo, localizada no rio Grande, entre as cidades de Icém (SP) e Fronteira (MG), sendo a Usina de Marimondo a segunda maior potência instalada dentre as usinas de FURNAS.

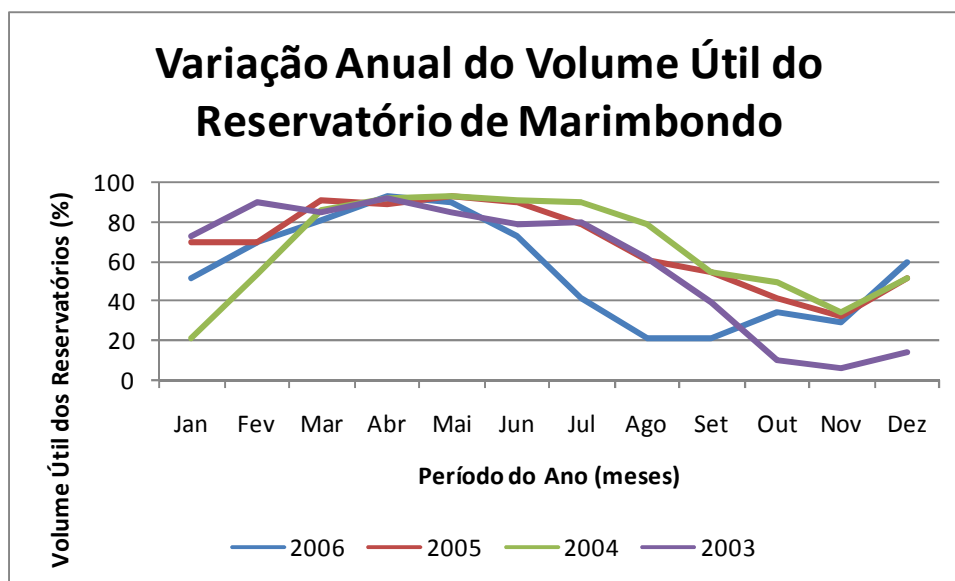


Figura 3. Variação do Volume Útil do Reservatório de Marimbondo. Fonte: ONS, 2008.

A informação que se pode obter à partir da análise comparativa da Figura 2 e da Figura 3 é que as Cargas de Energia tendem a assumir valores maiores justamente no período em que a disponibilidade de água nos reservatórios começa a diminuir.

Este fato permite identificar, em função da disponibilidade hídrica, duas situações, conforme menciona a Resolução ANEEL 456/00:

Período úmido (U): período de 5 (cinco) meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro de um ano a abril do ano seguinte.

Período seco (S): período de 7 (sete) meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de maio a novembro.

O atendimento ao mercado no período seco só é possível em virtude da capacidade de acumulação nos reservatórios das usinas que estocam a água afluyente durante o ano.

Assim, o fornecimento de energia no período seco tende, também, a ser mais oneroso, pois leva à necessidade de se construir grandes reservatórios, e eventualmente, operar usinas térmicas alimentadas por fontes energéticas importadas.

Devido a estes fatos típicos do comportamento da carga ao longo do dia, e ao longo do ano em função da disponibilidade de água, foi concebida a Estrutura Tarifária Horo-Sazonal, citada anteriormente, com sua Tarifa Azul e Verde, que compreende a sistemática de aplicação de tarifas e preços diferenciados de acordo com o horário do dia (ponta e fora de ponta) e períodos do ano (seco e úmido), como mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Estrutura Tarifária da Energia Elétrica no Brasil.

GRUPO A: Unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão inferior a 2,3 kV a partir de sistema subterrâneo de distribuição (artigo 82) caracterizado pela estruturação tarifária binômica e subdividido nos seguintes subgrupos							
Subgrupo	A1	A2	A3	A3a	A4	AS	
Tensão de fornecimento	acima de 230kV	88 a 138 kV	69 kV	30 a 44 kV	2.3 a 25 kV	< 2.3 kV	
GRUPO B: Unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão superior a 2,3 kV e faturadas neste Grupo, caracterizado pela estruturação tarifária monômica e subdividido nos seguintes subgrupos							
Subgrupo	B1	B1	B2	B2	B2	B3	B4
Tipo de consumidor	residencial	residencial baixa renda	rural	cooperativa elétrica rural	serviço público Irrigação	demaís classes	iluminação pública

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica.

O Artigo 20 da Resolução ANEEL 456/00 estabelece as seguintes classes e subclasses para efeito de aplicação de tarifas:

I - Residencial

II – Industrial

III – Convencional

IV – Rural

V – Poder Público

VI – Iluminação Pública

VII – Serviço Público

VIII – Consumo Próprio

A Tabela 5 traz uma média das tarifas praticadas nas regiões brasileiras e uma média ponderada a nível de Brasil.

Tabela 5. Tarifas Médias por Classe de Consumo Regional e Brasil (R\$ / MWh)

Classe de Consumo	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste	Brasil
Residencial	289.4	278.78	303.11	274.43	302.72	293.59
Industrial	219.71	209.11	222.79	207.74	219.8	216.61
Comercial	288.23	292.5	272.47	249.27	284.64	273.06
Rural	214.94	172.48	192.86	147.97	192.52	174.68
Poder Público	303.69	320.44	287.32	269.81	294.23	294.32
Iluminação Pública	164.46	171.98	167.88	143.98	164.79	164.19
Serviço Público	195.36	185.78	197.29	179.75	186.54	191.27
Consumo Próprio	285.91	307.18	291.71	233.81	301.15	283.88
Tarifa Média Total	262.54	251.08	261.9	226.38	260.83	252.91

Fonte: ANEEL. Tarifas referentes ao ano de 2007

A classe VII é referente ao fornecimento, exclusivamente, para motores, máquinas e cargas essenciais à operação de serviços públicos de água, esgoto, saneamento e tração elétrica urbana e/ou ferroviária, explorados diretamente pelo Poder Público ou mediante concessão ou autorização, devendo ser consideradas as seguintes subclasses:

- a) Tração Elétrica; e
- b) Água, Esgoto e Saneamento.

Os consumidores do grupo B apresentado na Tabela 4, são tarifados apenas em consumo, pela estruturação tarifária monômnia.

Os demais consumidores são obrigados ao regime de tarifa binômnia. Estes podem optar por uma das modalidades do sistema horo-sazonal, conforme sua conveniência, contratando a potência e o suprimento de energia.

A Resolução ANEEL 456/00 traz as seguintes definições à respeito:

Demanda contratada: demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela concessionária, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência fixados no contrato de fornecimento e que deverá ser integralmente paga, seja ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW).

No caso de se verificar demanda que supere em mais de 10% (demanda de ultrapassagem) o limite contratado o consumidor pagará o excesso calculado pela tarifa de ultrapassagem (tarifa aplicável sobre a diferença positiva entre a demanda medida e a contratada, quando exceder os limites estabelecidos, ANEEL, 2000). O valor da tarifa de ultrapassagem é três vezes o valor da tarifa básica, tanto para o horário fora de ponta quanto para o horário de ponta.

A verificação de demanda é feita pelo equipamento registrador da concessionária, instalado no ponto de medição da unidade consumidora, que a cada 15 minutos gera um registro para fins de faturamento. Nos campos deste registro, outros parâmetros, tais como fator de potência, também são guardados para os cálculos por ocasião da emissão da fatura mensal de energia.

Tratando-se do segmento horo-sazonal-azul, serão fixados dois valores de demanda contratada. Um para o horário de ponta e outro para o horário fora de ponta. O valor de potência, em kW, para o horário de ponta não pode ser inferior a 10% do valor estabelecido para o horário fora de ponta.

Tratando-se do segmento horo-sazonal-verde, não haverá contrato de demanda no horário de ponta. Presume-se que a unidade consumidora estará inativa, desligada ou utilizando outras fontes de energia no horário de ponta. Caso o registrador apresente algum consumo (energia) para o horário de ponta, este será faturado pela tarifa correspondente, que é cerca de dez vezes a tarifa para o horário fora de ponta.

Consumo: é o registro dos kW.h acumulados verificado no período de medição. Para os dois segmentos horo-sazonal há tarifas de consumo diferentes para os períodos seco e úmido.

Diante destas condições, os prestadores de serviços de saneamento devem estar atentos de forma a se adequar à tarifa horo-sazonal que traga as maiores economias com energia elétrica, visto que o horário de maior consumo de água coincide com o horário de ponta do consumo elétrico, fazendo com que o sistema que não for bem planejado e/ou operado apresente um gasto energética elevado.

4.5 Eficiência Energética nos Sistemas de Abastecimento

A energia elétrica tem representado um custo crescente para os prestadores de serviços de abastecimento de água e de esgotamento sanitário no Brasil. Ela representa

15,80% dos custos de exploração – (DEX – Despesas de Exploração), como mostra a Figura 4.

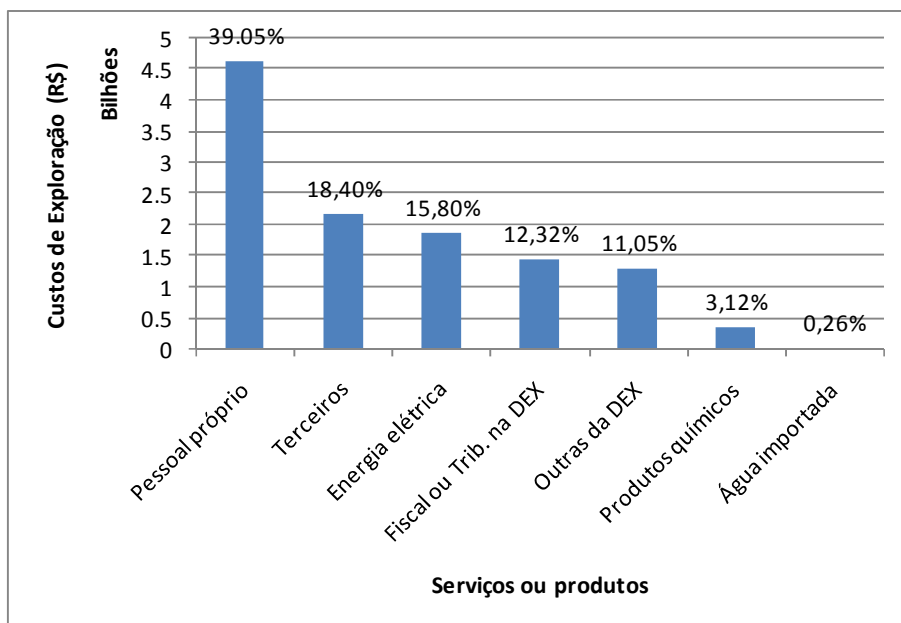


Figura 4. Custos de exploração da água para abastecimento. Fonte: SNIS (2006)

Tendo em vista o elevado percentual de participação nas despesas das prestadoras de serviços, o uso eficiente da energia elétrica se torna imprescindível na sustentabilidade do serviço, de modo a garantir maior retorno em forma de melhorias na qualidade e expansão do serviço.

A ineficiência energética em sistemas de abastecimento pode ser associada a vários fatores, dentre os quais podemos citar:

- Demanda contratada ou tarifa horo-sazonal inadequadas, que aumentam as despesas para a mesma carga consumida;
- O incorreto dimensionamento do sistema moto-bomba, que pode estar trabalhando fora da condição ótima de operação, o que faz com que o rendimento diminua;
- Conjunto moto-bomba com baixa eficiência, por ser velho ou estar em más condições de manutenção;
- Elevadas perdas de carga nas tubulações de recalque devido às condições físicas ou de manutenção (diâmetro muito pequeno para a vazão recalçada, tubulação corroída ou com incrustações,), o que exige uma maior potência do conjunto moto-bomba, com conseqüente aumento do consumo energético;
- Perdas reais e aparentes elevadas nos sistemas, aumentando o volume a ser recalcado até reservatórios para posterior distribuição;
- Energia potencial em excesso fornecida ao sistema.

A avaliação da eficiência energética é importante para estabelecer prioridades de intervenção e para controlar a eficácia das medidas implementadas, ou seja, antes das intervenções, devemos saber qual é o potencial de melhoria do sistema em questão,

quais os resultados esperados e então fazer um balanceamento do custo-benefício destas intervenções.

Os sistemas de abastecimento visam garantir o fornecimento de água em quantidade e qualidade suficientes, além de atender a critérios requeridos em normas, que no caso do Brasil é a NBR12218 que estabelece uma pressão dinâmica mínima de 100kPa e pressão estática máxima de 500kPa.

Para isso, o consumo de energia elétrica para recalque é necessário em quase todos os sistemas de abastecimento no Brasil, o que traz a necessidade de racionalizar estes consumos e os custos associados, de forma a garantir a sustentabilidade econômica da prestadora dos serviços, e principalmente implementar os conceitos de desenvolvimento sustentável.

Uma forma de avaliar a potencialidade de melhoria na eficiência energética de um sistema é a partir da construção de indicadores de eficiência, que podem ser usados para comparar a eficiência energética de sistemas e cenários distintos.

ALEGRE *et al.*(2006) citados por DUARTE *et al* (2008) apresentam a Tabela 6 onde são contemplados os mais importantes objetivos em termos de gestão de energia, com os critérios de avaliação mais importantes e exemplos de medidas de eficiência.

Além dos indicadores citados na tabela, ocorre o uso corrente do índice de consumo específico de energia (kWh/m³). No entanto, tal índice depende da topografia do terreno, que é a grande responsável pela quantidade de energia necessária no sistema. E sendo assim, este índice não é válido na comparação entre sistemas, pois estes dificilmente terão a mesma topografia.

Assim, DUARTE *et al* (2008) propõem novos indicadores de eficiência energética que venham a contornar esta problemática, tornando possível comparar a eficiência energética de sistemas através da comparação destes indicadores, utilizando o conceito de energia mínima e energia em excesso proposta por DUARTE *et al* (2008), na qual se compara a energia fornecida a um sistema com a energia mínima teórica necessária para atender a demanda e pressão em cada nó do sistema.

Tabela 6. Objetivos estratégicos, critérios de avaliação e indicadores de eficiência

Objetivo estratégico	Critério de avaliação	Medidas de eficiência
Assegurar o fornecimento do serviço em condições normais e de emergência	Manutenção de pressões adequadas nas redes de adução e distribuição	<p>QS10 - Adequação da pressão de serviço na distribuição (%)</p> <p><i>Percentagem dos pontos de entrega (em ramais) onde as pressões na hora de maior consumo são iguais ou superiores aos valores requeridos.</i></p>
Garantir sustentabilidade da entidade gestora	Dimensão adequada das infra-estruturas	<p>Ph4 - Utilização da capacidade de bombeamento (%)</p> <p><i>Percentagem máxima de capacidade de bombeamento (que pode ser utilizada em simultâneo) e que foi efetivamente utilizada.</i></p>
	Sustentabilidade económico-financeira	<p>Fi10 - Custos de energia elétrica (%)</p> <p><i>Percentagem de custos correntes correspondentes a energia elétrica</i></p>
Proteger o ambiente	Redução das quantidades de energia consumida	<p>Ph5 - Consumo de energia normalizado (kWh/m³/100m)</p> <p><i>Consumo médio de energia de bombeamento de 1 m³ a 100 m de elevação.</i></p>
		<p>Ph6 - Consumo de energia reativa (%)</p> <p><i>Percentagem do consumo total de energia de bombeamento que corresponde ao consumo de energia reativa</i></p>
		<p>Ph7 - Recuperação de energia (%)</p> <p><i>Percentagem do consumo total de energia de bombeamento que é recuperada pelo uso de turbinas ou por bombas de eixo reversível</i></p>
	Utilização de energias renováveis	(não contemplado)

Fonte: DUARTE *et al* (2008).

Por definição, a potência do escoamento numa seção de um sistema em pressão é dada pela equação 2.

$$P_e = \gamma * Q * H$$

Equação 2

Sendo, P_e a potência do escoamento (W); γ o peso específico da água (9800 N/m³); Q a vazão (m³/s) e H a carga hidráulica na seção a um dado referencial (m.c.a.)

DUARTE *et al* (2008) traz ainda os vários tipos de potência do escoamento num sistema de abastecimento, conforme citado abaixo:

Potência fornecida – é toda a potência fornecida ao sistema, considerando as diversas origens, medida em relação à cota de referência adotada;

Potência mínima (teórica) - é o somatório das potências mínimas exigidas em cada nó, em todos os pontos de consumo para satisfazer as respectivas pressões mínimas (p_{\min}^i), medidas em relação à cota de referência adotada;

Potência em excesso (teórica) - corresponde à diferença entre a potência fornecida e a potência mínima;

Potência dissipada – toda a potência dissipada no escoamento, devido as perdas de carga;

Potência disponível - é dada pela diferença entre a potência fornecida e a potência dissipada;

Potência supérflua - corresponde à potência fornecida ao sistema para além da soma da potência mínima com a potência dissipada.

A Figura 5 representa graficamente as diversas potências e seu comportamento.

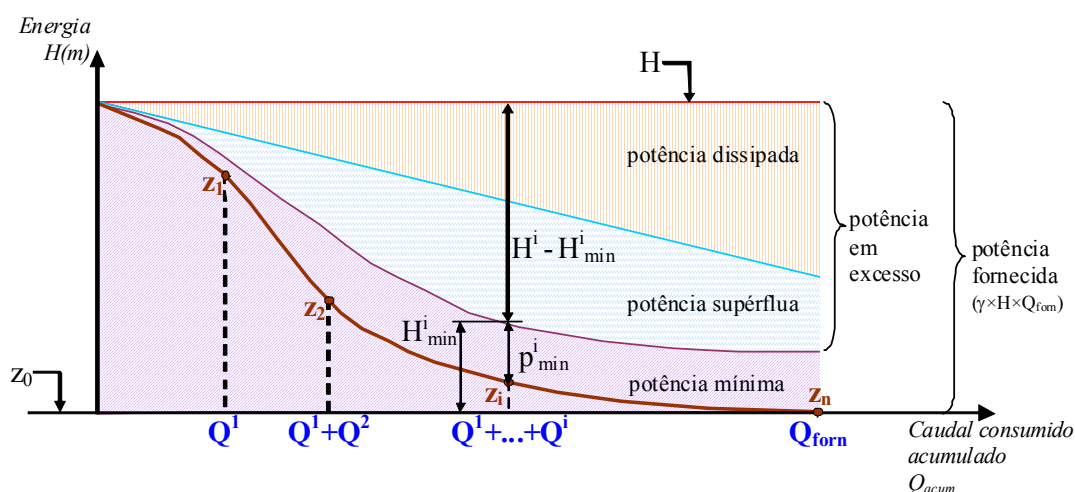


Figura 5. Representação dos vários tipos de potência num sistema de abastecimento de água. Fonte. DUARTE *et al* (2008)

Em um sistema de abastecimento, é requisito fornecer a vazão e pressão exigidas em cada ponto do sistema. No entanto, ocorre que para atendermos o ponto mais

desfavorável da rede, outros pontos podem estar recebendo uma potência em excesso teórica. Este excesso é calculado pela diferença entre a potência fornecida (P_{forn}) e a potência mínima necessária ($P_{\text{min}} = \sum P_{\text{min}}^i$).

$$P_{\text{exc}} = P_{\text{forn}} - \sum P_{\text{min}}^i \quad \text{Equação 3}$$

Considerando que a energia fornecida ao sistema é proveniente de uma origem (e.g., reservatório) com carga hidráulica H , a potência fornecida, no instante t , é dada por:

$$P_{\text{forn}}(t) = \gamma * Q_{\text{forn}}(t) * H(t) \quad \text{Equação 4}$$

Sendo $P_{\text{forn}}(t)$ a potência fornecida ao sistema no instante t (W); $Q_{\text{forn}}(t)$ a vazão de entrada no sistema (faturado e não faturado) no instante t (m^3/s) e $H(t)$ a carga hidráulica na origem no instante t medida em relação ao referencial adotado (e.g., cota do nível de água no reservatório) (m.c.a.).

Por outro lado, a potência mínima a disponibilizar ao sistema no instante t , $P_{\text{min}}(t)$, corresponderá ao somatório das potências mínimas requeridas em cada nó, de modo a satisfazer os respectivos consumos (que não incluem perdas de água na rede pública) e os requisitos mínimos de pressão. A potência mínima é dada por:

$$P_{\text{min}}(t) = \sum_{i=1}^n P_{\text{min}}^i(t) = \gamma * \sum_{i=1}^n (Q^i(t) * H_{\text{min}}^i) \quad \text{Equação 5}$$

Onde $P_{\text{min}}^i(t)$ é a potência mínima a garantir no nó i no instante t (W); $Q^i(t)$ a vazão consumida no nó i no instante t (m^3/s); H_{min}^i a cota piezométrica mínima requerida no nó i medida em relação ao referencial adotado (m.c.a.) e n o número de pontos de consumo.

Em situações em que há recuperação de parte da energia fornecida ao escoamento (i.e., através da instalação de turbinas), a potência recuperada (teórica) no instante t , $P_{\text{rec}}(t)$, é dada por:

$$P_{\text{rec}}(t) = \sum_{k=1}^{N_T} P_{\text{rec}}^k(t) = \gamma * \sum_{k=1}^{N_T} (Q^k(t) * H_{\text{rec}}^k(t)) \quad \text{Equação 6}$$

Sendo $P_{\text{rec}}^k(t)$ a potência recuperada teórica no nó k no instante t (admitindo rendimentos das turbinas de 100%) (W); $Q^k(t)$ a vazão turbinada no nó k no instante t (m^3/s); $H_{\text{rec}}^k(t)$ a carga hidráulica recuperada (queda útil) no nó k no instante t (m.c.a.) e N_T o número de nós com recuperação de energia.

A potência em excesso (teórica) no instante t , dada pela diferença entre o balanço das potências fornecida e recuperada e a potência mínima, é:

$$P_{\text{exc}}(t) = [P_{\text{forn}}(t) - P_{\text{rec}}(t)] - P_{\text{min}}(t) \quad \text{Equação 7}$$

Quanto maiores os desníveis topográficos, maior será o valor da parcela P_{min} . Ao retirar da potência fornecida a parcela que depende dos desníveis topográficos (P_{min}), a variável resultante já permite efetuar comparações entre sistemas. Além disso, a potência em excesso tem a vantagem de ser independente do referencial adotado para a medição das cotas.

A potência disponível poderia ser usada ao invés da potência em excesso. No entanto, esta depende da topologia do sistema, dos diâmetros e das rugosidades das tubulações. Uma vez que uma das formas de melhorar a eficiência energética é alterar qualquer destas características, e se pretende que a medida a usar seja independente de

características que possam ser alteradas pelo gestor, a potência disponível não é uma variável adequada ao estabelecimento de comparações. Da forma como foi definida, a potência em excesso (P_{exc}) depende apenas da carga hidráulica na origem, da topografia, dos consumos e dos requisitos de pressão.

Esta variável destina-se a permitir avaliar o potencial de melhoria de um sistema em termos de consumo de energia e compará-lo com o de outros sistemas, de modo a permitir estabelecer prioridades de intervenção.

Dado que as vazões variam no tempo, a energia correspondente a qualquer uma das potências atrás referidas obtém-se pela integração das mesmas no intervalo de tempo em análise.

Além dos três indicadores de eficiência energética propostos por DUARTE *et al* (2008), será elaborado um quarto (E4).

4.5.1 E1 - Energia em Excesso por Volume de Água entrada no Sistema

Este índice, proposto por DUARTE *et al* (2008) é sempre superior a zero, dado que em qualquer sistema real existe energia dissipada. No entanto, quanto menor for este índice, melhor. Este traduz o potencial teórico de redução de energia por m^3 de água entrada no sistema.

O índice é adequado para avaliar o impacto de medidas de gestão de energia tais como a utilização de grupos eletrobomba com velocidade de rotação ou a redução da carga hidráulica fornecida na origem. No entanto, não é adequado para avaliar o efeito de medidas de controle de perdas de água na eficiência energética do sistema, dado que estas se traduzem na redução da vazão fornecida (Q_{forn}), que intervém não só no numerador mas também no denominador, não sendo evidente o sentido da variação do índice. Pelos mesmos argumentos também não é adequado para comparar sistemas com diferentes níveis de perdas de água. Neste contexto, sugere-se o índice seguinte:

$$E1 = \frac{E_{exc}}{V_{forn}} = \frac{\int P_{exc}(t)dt}{\int Q_{forn}(t)dt} \quad \text{Equação 8}$$

Caso a vazão seja constante no tempo, a equação pode ser reescrita como segue:

$$E1 = \frac{P_{exc}}{Q_{forn}} = \frac{P_{for} - P_{rec} - P_{min}}{Q_{forn}} \quad \text{Equação 9}$$

$$E1 = \frac{\gamma * (Q_{for} * H - \sum_{K=1}^{N_1} Q^K * H_{rec}^K - \sum_{i=1}^n Q^i * H_{min}^i)}{3.6 * 10^6 * Q_{forn}} \quad \text{Equação 10}$$

4.5.2 E2 - Energia em Excesso por Volume de Água Faturada

Este índice também é sempre superior a zero, sendo desejável que seja tão reduzido quando possível. Traduz o potencial teórico de redução de energia por m^3 de água faturada.

Este índice permite verificar a influência das perdas de água na economia com energia (recalar a água até reservatórios), pois se tiver redução das perdas reais, o índice terá um valor inferior, pois o numerador diminui enquanto o denominador se mantém.

A redução de perda de carga por reabilitação da rede só terá reflexo em termos de energia no que se refere aos indicadores E1 e E2 se for possível reduzir a carga hidráulica disponibilizada (potência fornecida).

Medidas que conduzam à redução de perdas aparentes, têm um efeito direto na redução do valor do índice E2, não só porque fazem aumentar o denominador (volume faturado), mas também porque o numerador diminui (a potência fornecida mantém-se, mas a potência mínima aumenta).

$$E2 = \frac{E_{exc}}{V_{fat}} = \frac{\int P_{exc}(t)dt}{\int Q_{fat}(t)dt} \quad \text{Equação 11}$$

$$E2 = \frac{P_{exc}}{Q_{fat}} = \frac{P_{for} - P_{rec} - P_{min}}{Q_{fat}} \quad \text{Equação 12}$$

$$E2 = \frac{\gamma * (Q_{for} * H - \sum_{K=1}^{N_1} Q^K * H_{rec}^K - \sum_{i=1}^n Q^i * H_{min}^i)}{3.6 * 10^6 * Q_{fat}} \quad \text{Equação 13}$$

4.5.3 E3 - Economia de Energia em Excesso

O terceiro índice é a relação da energia fornecida pela energia mínima, quantificando diretamente o excesso teórico que é fornecido ao sistema, sendo sempre superior a 1, visto que a energia fornecida inclui sempre uma parcela de energia para cobrir as perdas dos sistemas. No entanto depende do referencial adotado para as cotas.

Por esta razão é importante adotar a cota de referência como a cota do ponto mais desfavorável do sistema.

$$E3 = \frac{E_{forn}}{E_{min}} = \frac{\int P_{forn}(t)dt}{\int P_{min}(t)dt} \quad \text{Equação 14}$$

$$E3 = \frac{P_{forn}}{P_{min}} = \frac{(Q_{for} * H - \sum_{K=1}^{N_1} Q^K * H_{rec}^K)}{\sum_{i=1}^n Q^i * H_{min}^i} \quad \text{Equação 15}$$

4.5.4 E4 - Energia em Excesso por Volume de Água Perdida Real

E finalmente é calculado o índice E4 que representa a energia em excesso por volume de água perdida real. Este índice a exemplo dos dois primeiros, sempre será superior a zero, no entanto, quanto maior, melhor será a eficiência energética, visto apresentar menores perdas. A energia em excesso só irá aumentar no caso de aumentarmos a potência fornecida, enquanto a potência mínima permanece constante. E para que ocorra aumento da energia fornecida, é necessário aumentar a vazão, que aumentará caso aumentem as perdas.

$$E4 = \frac{E_{exc}}{V_{perdas\ reais}} = \frac{\int P_{exc}(t)dt}{\int Q_{perdas\ reais}(t)dt} \quad \text{Equação 16}$$

$$E4 = \frac{\gamma * (Q_{for} * H - \sum_{K=1}^{N_1} Q^K * H_{rec}^K - \sum_{i=1}^n Q^i * H_{min}^i)}{3.6 * 10^6 * Q_{perdas\ reais}} \quad \text{Equação 17}$$

Para que os indicadores acima propostos tenham a unidade de kWh/m³, todas as variáveis de entrada nas equações devem ter as seguintes unidades: $\gamma = 9800\text{N/m}^3$; as vazões quaisquer que sejam devem ser incluídas em m³/s; H = m.c.a.

5 METODOLOGIA

O uso dos indicadores para avaliação da eficiência energética foi feito com base nos dados reais do sistema de abastecimento de água do bairro Coopha e do bairro Nova Lima, ambos localizados na cidade de Campo Grande, Mato Grosso do Sul.

Os dados de micro e macromedição, bem como os modelos de simulação matemática utilizando o software EPANET 2 já calibrados, foram obtidos junto ao Departamento de Hidráulica e Transportes localizado no Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, sendo fornecidos pelo Engenheiro Narumi Abe.

Para determinação dos indicadores propostos, foram inicialmente determinadas as seguintes variáveis para cada indicador:

Tabela 7. Valores de entrada para o cálculo dos índices

VARIÁVEIS	E1	E2	E3	E4
Vazão fornecida (Q_{fom}) em m^3/s	X	X	X	X
Vazão faturada (Q_{fat}) em m^3/s		X		
Vazão perdas reais ($Q_{\text{perdas reais}}$) em m^3/s				X
Vazão consumida em cada nó i (Q^i) em m^3/s	X	X	X	X
Carga hidráulica mínima em cada nó i (H_{min}^i) em m.c.a.	X	X	X	X
Carga hidráulica fornecida pelo reservatório (H) em m.c.a.	X	X	X	X
Peso específico da água γ ($9800\text{N}/\text{m}^3$)	X	X	X	X

Abaixo estão listadas estas variáveis, sua definição e a forma como as mesmas foram determinadas:

Vazão fornecida: quantidade de água que sai do reservatório para o sistema. Para o modelo calibrado, é o somatório da quantidade de água que passa pela tubulação imediatamente a jusante do reservatório.

Vazão Faturada: é a quantidade de água que efetivamente é paga à concessionária, pelo serviço de levá-la até o consumidor. Este valor foi fornecido pela concessionária, e representa a vazão micromedida, que para o modelo calibrado, é representada pelo somatório do consumo base de cada nó (CB_i).

A diferença da vazão fornecida pela vazão faturada representa as perdas totais do sistema.

$$\text{PERDAS TOTAIS} = \text{VAZÃO FORNECIDA} - \text{VAZÃO FATURADA} \quad \text{Equação 18}$$

Estas perdas também podem ser calculadas fazendo a diferença entre o volume fornecido ao sistema, obtido a partir do somatório do consumo de cada nó (C_i) e o somatório do consumo base de cada nó.

$$\text{PERDAS TOTAIS} = \sum_{i=1}^n C_i * \Delta t - \sum_{i=1}^n CB_i * \Delta t \quad \text{Equação 19}$$

Vazão de Perdas Reais: Foram identificados no modelo, os nós em que foram associadas as perdas. Fazendo-se a diferença do somatório do consumo corrente (que inclui o consumo base e demais consumos, que neste caso seriam as perdas reais) e o somatório do Consumo Base (CB). Assim:

$$\text{PERDAS REAIS} = \sum C_i - \sum_i CB_i \quad \text{Equação 20}$$

Onde i são os nós que apresentam as perdas associadas.

E finalmente, fazendo-se a diferença entre as perdas totais e as perdas reais obtivemos as perdas aparentes do sistema.

$$\text{PERDAS APARENTES} = \text{PERDAS TOTAIS} - \text{PERDAS REAIS} \quad \text{Equação 21}$$

Vazão Consumida em cada Nó: É definido no modelo EPANET como o Consumo Corrente, que é o volume consumido por um nó em um dado intervalo de tempo. Como os sistemas apresentavam um padrão de consumo horário, tivemos ao longo do dia momentos em que o consumo corrente foi maior ou menor do que o consumo base. No entanto o somatório do consumo corrente ao longo do dia foi igual ao somatório do consumo base neste mesmo período. Mas isso só foi válido para os casos em que o nó não apresentava perdas associadas. Nos casos em que isto ocorreu, tivemos um consumo base diário inferior ao consumo corrente totalizado ao longo do dia.

O padrão de consumo horário mencionado anteriormente é a variação horária no consumo de água ao longo de um dia devido ao comportamento dos consumidores. Assim, para obter a vazão diária foi feito o somatório das vazões horárias.

Carga Hidráulica mínima em cada nó: Foi considerada como constante, conforme preconiza a NBR12218 que estabelece uma pressão dinâmica mínima de 100kPa e pressão estática máxima de 500kPa.

Carga Hidráulica fornecida pelo reservatório: é a diferença de cota entre o nível superior do reservatório e a cota do nó, subtraídas as perdas de carga. Estes valores foram variáveis ao longo do dia, devido ao padrão de consumo que gerou diferentes vazões e conseqüentes perdas de carga diferenciadas. A referência adotada para a determinação da carga hidráulica fornecida foi a mesma utilizada na plano-altimétrica. DUARTE *et al*(2008) recomenda que seja adotada como referência o ponto mais desfavorável do sistema. No entanto, como o modelo EPANET 2.0 fornece diretamente as pressões existentes em cada nó, em cada instante, tendo como referência a carga hidráulica fornecida pelo reservatório e sua respectiva cota, o mesmo procedimento foi adotado no cálculo dos índices, até porque neste caso a mudança de referencial não afetou os resultados.

Peso Específico da Água: Adotado o valor de 9800N/m³.

Após computar as variáveis nos sistemas reais, as mesmas foram determinadas em diversos cenários. Estes cenários foram criados de forma a possibilitar uma melhor avaliação da resposta dos indicadores nas diferentes situações, possibilitando assim a melhor compreensão e verificar a eficácia destes indicadores na avaliação da eficiência energética nos diferentes sistemas e diferentes cenários.

Abaixo está descrita a nomenclatura utilizada para cada sistema e cada cenário com as respectivas características.

Sistema A: Sistema de abastecimento de água real do bairro Coopha;

Cenário A1: Perdas reais nulas no sistema de abastecimento do bairro Coopha;

Cenário A2: Perdas Totais na ordem de 25% no sistema de abastecimento de água do bairro Coopha;

Cenário A3: Perdas Totais na ordem de 50% no sistema de abastecimento de água do bairro Coopha;

Cenário A4: Perdas Totais na ordem de 75% no sistema de abastecimento de água do bairro Coopha;

Cenário A5: Perdas Totais aproximadamente iguais ao do Sistema A, no entanto com coeficiente do Emissor igual para todos os nós;

Sistema B: Sistema de abastecimento de água real do bairro Nova Lima.

6 RESULTADOS

6.1 Descrição dos Sistemas Reais

A Tabela 8 traz uma síntese dos dois sistemas que serão utilizados na avaliação dos indicadores de eficiência energética.

Tabela 8. Síntese dos sistemas em estudo

	Sistema A	Sistema B	Unidades
Extensão da rede	6631	59.311	m
Nº de nós	71	494	
Nº de Reservatórios	1	1	
Nº de trechos	70	597	
Nº de bombas	0	0	
N de válvulas	1	0	
Fornecido Total	31.815	112.741	m ³ /mês
Micromedido Total	12.623	30.170	m ³ /mês
População Atendida	2.805	6.704	hab
Perdas Totais	19.193	82.570	m ³ /mês
	60.32	73.24	%
Perdas Reais	18.742	80.220	m ³ /mês
	97.65	97.15	%
Perdas Aparentes	450	2.350	m ³ /mês
	2.35	2.85	%

A população referida na tabela acima foi determinada levando em consideração o volume micromedido e um consumo *per capita* de 150 L/hab./dia.

No Anexo 1 e Anexo 2 estão representados os sistemas A e B.

No Anexo 3 e Anexo 4 estão representados o perfil topográfico de cada sistema, utilizando a mesma escala e o mesmo intervalo de dados, de forma a permitir uma avaliação visual direta e melhor interpretação dos resultados.

A determinação da declividade média $I_m(\%)$ de um trecho é definida como segue:

$$I_{media}(\%) = \left[\frac{(H_1 - H_2)}{\Delta L_{1-2}} \right] * 100 \quad \text{Equação 22}$$

Onde H_1 é a cota do ponto mais alto (m). Foi considerado o primeiro nó imediatamente a jusante do reservatório; H_2 é a cota do ponto mais baixo (m). Neste caso foi considerado o ponto mais afastado, que em ambos os sistemas é ligeiramente superior a cota mais baixa e ΔL_{1-2} a distância entre os dois pontos (m).

O resultado na Tabela 9 mostra declividade no Sistema A maior do que no Sistema B. No entanto o último é bem mais extenso o que traz aos nós mais afastados e mais baixos, um acúmulo de carga hidráulica, que como será visto, apresenta valores de pressões superiores a 50 m.c.a. o que acarreta maiores probabilidades de perdas devido a esse excesso de pressão, além de ser uma energia que estará sendo perdida no sistema.

Tabela 9. Declividade média dos sistemas A e B

	Sistema A	Sistema B
Cota Final (m)	571.26	620.76
Cota Inicial (m)	599.40	695.00
Distância (m)	1091.84	4450
Declividade Média %	2.58	1.67

Ainda o que diz respeito aos dois sistemas, são os respectivos padrões de consumo horário, que estão representados na Figura 6 e Figura 7.

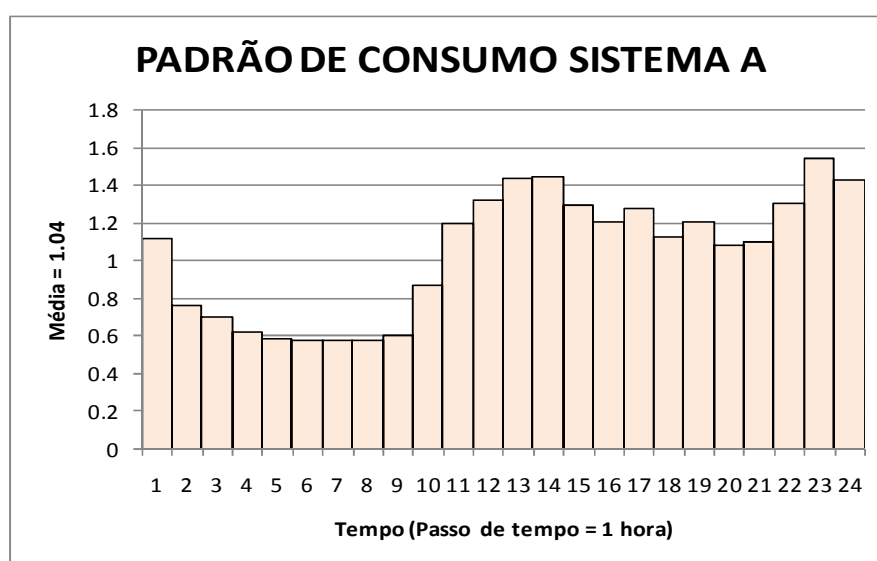


Figura 6. Padrão de consumo do Sistema A

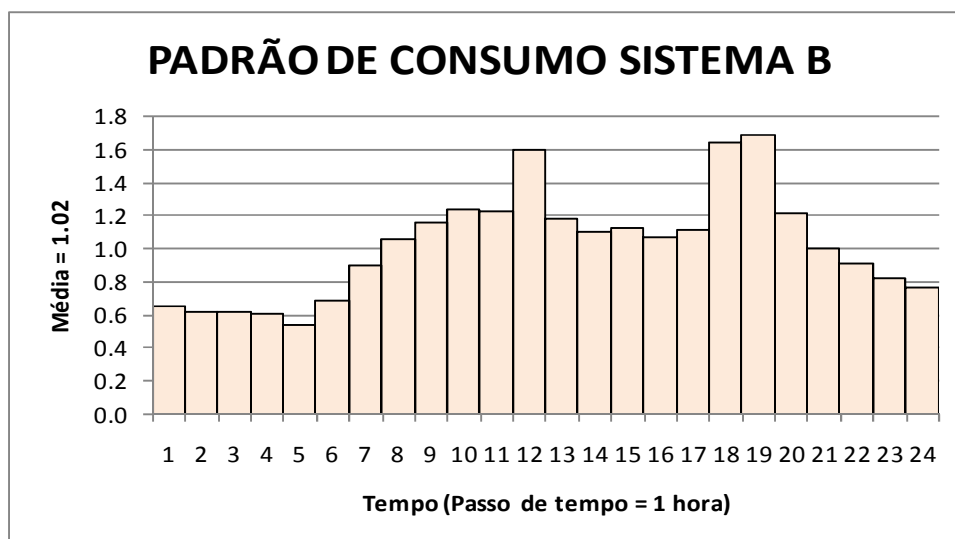


Figura 7. Padrão de Consumo do Sistema B

6.2 Formulação dos cenários

Além dos sistemas reais, foram elaborados 5 cenários alternativos, todos eles utilizando o Sistema de Abastecimento de Água A.

No cenário A1, os coeficientes dos emissores (CE) foram zerados para todos os nós. Essa operação resulta em um modelo que não apresenta perdas reais. No entanto as perdas aparentes foram mantidas, com o mesmo valor do que no sistema real A.

Para zerar os CEs no modelo EPANET 2, acessamos o menu Edit – Select All e posteriormente Edit – Group Edit, e então completamos a janela, conforme mostra a Figura 8.

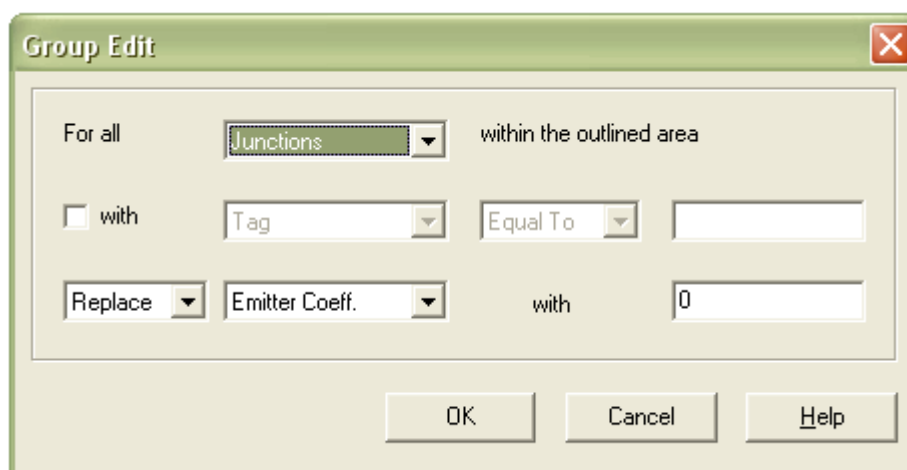


Figura 8. Zerando o CE dos nós do sistema

Após tal alteração o modelo foi rodado, e os dados necessários para o cálculo dos indicadores foram obtidos.

É importante salientar que a potência mínima exigida pelo sistema é igual para todos os cenários, e é determinada considerando as perdas nulas. Assim, tanto para o sistema A quanto B, os CEs foram zerados para então determinarmos a potência mínima que foi utilizada para determinação dos indicadores.

Já para podermos determinar os indicadores de eficiência para os cenários propostos com perdas totais de aproximadamente 25, 50 e 75%, foi necessário determinar um Coeficiente Emissor (CE) que aplicado à todos os nós, daria um valor de perdas totais próximo ao proposto.

Para se chegar a estes valores do CE, foram feitas 7 simulações, variando este coeficiente, que gerava uma respectiva perda total. De posse destes valores, foi elaborada a curva dos Coeficientes Emissores e as respectivas perdas totais, obtendo uma equação.

A Tabela 10 mostra os valores de CE simulados que forma utilizados na construção da curva mostrada na Figura 9. Na mesma tabela vemos os valores de CE obtidos à partir da equação que geram perdas totais aproximadas de 25, 50 e 75%.

Tabela 10: Valores de CE utilizados na obtenção da curva e CE adotados

Pontos obtidos a partir de simulações		CE adotado	Perdas Totais (%)	
CE	Perdas Totais (%)		A partir da curva	Calculadas pelo EPANET
0	3.68	0.004	25.24	26.02
0.0005	7.21	0.012	50.67	49.28
0.001	10.51	0.038	75.15	74.06
0.005	30.21			
0.01	45.14			
0.05	78.44			
0.1	86.21			

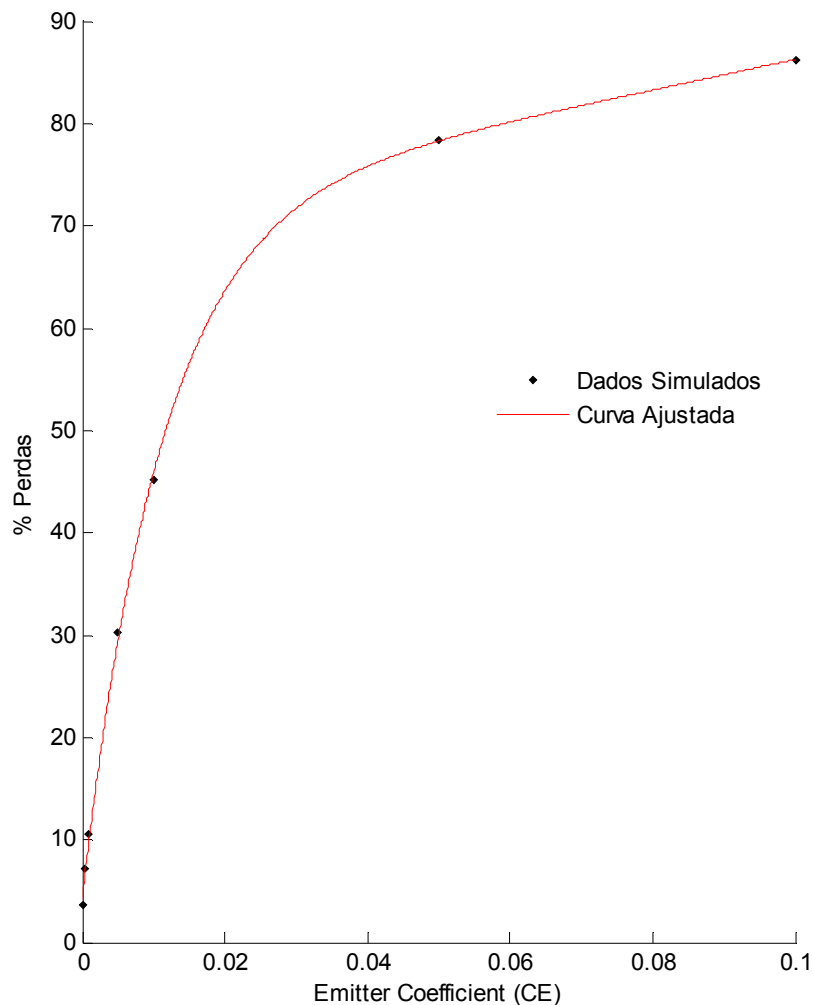


Figura 9. Curva das Perdas Totais x CE

Equação da Curva:

$$f(x) = 72.47 * e^{1.743*x} - 68.28 * e^{-89.48*x}$$

Equação 23

Coeficientes com 95% de confiança.

Com os CEs determinados, foram simulados os cenários A2, A3 e A4. Nestes três cenários as perdas aparentes foram computadas como tendo o mesmo valor do Sistema Real A.

E finalmente para o sistema A, foi elaborado o cenário A5 na qual foi estimado à partir da curva um valor de CE que aplicado em todos os nós gerou um valor de perdas totais muito próximo ao real, no entanto com uma distribuição destas perdas diferente da que ocorre no sistema real, sendo as mesmas distribuídas entre todos os nós.

A última simulação foi feita em outro sistema de abastecimento de água, Sistema B. Os procedimentos de cálculo foram os mesmos que foram aplicados ao Sistema real A.

6.3 Volumes fornecidos

A Tabela 11 traz os resultados dos volumes fornecidos ao Sistema real A e seus cenários A1, A2, A3, A4 e A5 e ao Sistema real B. Na tabela também estão discriminados as vazões horárias de cada sistema e cenário.

Tabela 11. Volume fornecido aos Sistemas simulados

Hora do dia	Volume fornecido ao sistema em cada cenário simulado						
	A	A1	A2	A3	A4	A5	B
0:00	44.964	19.476	24.912	35.604	67.932	45	147.996
1:00	39.636	13.32	18.828	29.7	62.784	39.276	147.024
2:00	38.988	12.276	17.856	28.908	62.532	38.628	147.024
3:00	38.052	10.872	16.524	27.756	61.992	37.656	146.808
4:00	37.512	10.152	15.876	27.144	61.56	37.08	145.368
5:00	37.332	10.008	15.696	26.964	61.38	36.9	148.68
6:00	37.332	10.008	15.696	26.964	61.344	36.864	153.756
7:00	37.296	10.008	15.696	26.928	61.272	36.828	157.068
8:00	37.692	10.512	16.2	27.396	61.596	37.26	159.264
9:00	41.868	15.264	20.88	32.004	65.736	41.76	160.956
10:00	46.872	20.88	26.46	37.476	70.74	47.124	160.74
11:00	48.78	23.148	28.692	39.636	72.504	49.212	168.3
12:00	50.328	25.056	30.564	41.4	73.872	50.868	159.876
13:00	50.4	25.236	30.744	41.508	73.8	50.904	158.184
14:00	48.024	22.608	28.116	38.88	71.316	48.312	158.616
15:00	46.548	21.024	26.532	37.296	69.804	46.728	157.284
16:00	47.592	22.284	27.72	38.484	70.776	47.88	158.4
17:00	45.216	19.62	25.092	35.856	68.292	45.288	169.272
18:00	46.764	21.384	26.82	37.548	69.84	46.944	170.064
19:00	44.604	18.936	24.408	35.172	67.716	44.64	160.524
20:00	44.928	19.296	24.768	35.532	68.04	44.964	155.988
21:00	47.88	22.788	28.188	38.844	70.776	48.132	153.972
22:00	51.408	27	32.328	42.804	74.088	51.948	151.92
23:00	49.536	24.912	30.24	40.716	72.144	49.896	150.552
TOTAL (m³/dia)	1059.6	436.1	568.8	830.5	1621.8	1060.1	3747.6

6.4 Volumes micromedidos

A Tabela 12 traz os volumes micromedidos em cada sistema e em cada cenário. No sistema A o volume micromedido, que é equivalente ao volume faturado, totalizou 420, 77m³/dia. Este mesmo valor foi utilizado para os cenários A1, A2, A3, A4 e A5. Já no sistema B o volume micromedido totalizou 1005,70m³ diários.

Tabela 12. Volumes micromedidos

	Volume micromedido nos sistemas em cada cenário simulado						
	A	A1	A2	A3	A4	A5	B
TOTAL (m³/dia)	420.77	420.77	420.77	420.77	420.77	420.77	1005.70

6.5 Perdas totais

A diferença do volume fornecido pelo volume micromedido representa as perdas totais do sistema, apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13. Perdas totais

	Perdas totais						
	A	A1	A2	A3	A4	A5	B
TOTAL (m³/dia)	639.76	15.01	148.00	408.78	1201.10	639.79	2752.34
TOTAL (%)	60.32	3.43	26.02	49.28	74.06	60.33	73.24

6.6 Perdas reais e aparentes

Nos sistemas A e B foram identificados os nós em que foram associadas perdas. Na Tabela 14 está a planilha com os nós do sistema A que apresentavam o CE diferente de zero. A identificação dos nós e seus respectivos CEs está disposta na Tabela 15.

Conforme foi descrito anteriormente, fazendo-se a diferença do somatório do Consumo corrente (que inclui o consumo base e demais consumos, que neste caso seriam as perdas reais) e o somatório do Consumo Base (CB), obtemos o valor das perdas reais. E finalmente, fazendo-se a diferença entre as perdas totais e as perdas reais teremos as perdas aparentes do sistema.

A Tabela 16 traz a síntese dos resultados das perdas reais e aparentes em m³/dia, e seu respectivo peso percentual dentro das perdas totais.

Tabela 14. Planilha de cálculo das perdas reais no Sistema A

Tempo	Nó 33		Nó 39		Nó 41		Nó 45		Nó 46		Nó 47		Nó 53	
Horas do dia	C. B	C. C	C. B	C. C	C. B	C. C	C. B	C. C	C. B	C. C	C. B	C. C	C. B	C. C
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
00:00	0.02	2.88	0.05	0.19	0.06	0.21	0.07	0.16	0.08	0.14	0.05	0.14	0.06	3.79
01:00	0.02	2.96	0.05	0.18	0.06	0.19	0.07	0.14	0.08	0.11	0.05	0.12	0.06	3.91
02:00	0.02	3.00	0.05	0.18	0.06	0.19	0.07	0.13	0.08	0.11	0.05	0.12	0.06	3.96
03:00	0.02	3.05	0.05	0.18	0.06	0.19	0.07	0.13	0.08	0.11	0.05	0.12	0.06	4.02
04:00	0.02	3.07	0.05	0.17	0.06	0.19	0.07	0.13	0.08	0.10	0.05	0.12	0.06	4.04
05:00	0.02	3.07	0.05	0.17	0.06	0.19	0.07	0.13	0.08	0.10	0.05	0.12	0.06	4.04
06:00	0.02	3.07	0.05	0.17	0.06	0.19	0.07	0.13	0.08	0.10	0.05	0.12	0.06	4.04
07:00	0.02	3.06	0.05	0.17	0.06	0.19	0.07	0.13	0.08	0.10	0.05	0.12	0.06	4.04
08:00	0.02	3.05	0.05	0.17	0.06	0.19	0.07	0.13	0.08	0.10	0.05	0.12	0.06	4.02
09:00	0.02	3.00	0.05	0.19	0.06	0.20	0.07	0.15	0.08	0.12	0.05	0.13	0.06	3.95
10:00	0.02	2.94	0.05	0.20	0.06	0.22	0.07	0.17	0.08	0.15	0.05	0.15	0.06	3.86
11:00	0.02	2.90	0.05	0.21	0.06	0.23	0.07	0.18	0.08	0.16	0.05	0.15	0.06	3.81
12:00	0.02	2.86	0.05	0.21	0.06	0.23	0.07	0.18	0.08	0.17	0.05	0.16	0.06	3.76
13:00	0.02	2.85	0.05	0.21	0.06	0.23	0.07	0.18	0.08	0.17	0.05	0.16	0.06	3.74
14:00	0.02	2.87	0.05	0.20	0.06	0.23	0.07	0.17	0.08	0.16	0.05	0.15	0.06	3.78
15:00	0.02	2.88	0.05	0.20	0.06	0.22	0.07	0.17	0.08	0.15	0.05	0.15	0.06	3.80
16:00	0.02	2.86	0.05	0.20	0.06	0.22	0.07	0.17	0.08	0.15	0.05	0.15	0.06	3.77
17:00	0.02	2.89	0.05	0.19	0.06	0.21	0.07	0.16	0.08	0.14	0.05	0.14	0.06	3.80
18:00	0.02	2.87	0.05	0.20	0.06	0.22	0.07	0.17	0.08	0.15	0.05	0.15	0.06	3.77
19:00	0.02	2.90	0.05	0.19	0.06	0.21	0.07	0.16	0.08	0.14	0.05	0.14	0.06	3.82
20:00	0.02	2.89	0.05	0.19	0.06	0.21	0.07	0.16	0.08	0.14	0.05	0.14	0.06	3.81
21:00	0.02	2.84	0.05	0.20	0.06	0.22	0.07	0.17	0.08	0.16	0.05	0.15	0.06	3.73
22:00	0.02	2.77	0.05	0.21	0.06	0.24	0.07	0.19	0.08	0.17	0.05	0.16	0.06	3.65
23:00	0.02	2.79	0.05	0.21	0.06	0.23	0.07	0.18	0.08	0.16	0.05	0.15	0.06	3.67
TOTAL (m³/d)	1.73	253.15	4.32	16.52	5.18	18.18	6.05	13.57	6.91	11.74	4.32	11.99	5.18	333.29

Consumo Corrente Total (m³/d)	658.44
Consumo Base Total (m³/d)	33.70
Perdas Reais Total (m³/d)	624.74

A planilha de cálculo do sistema B foi elaborada seguindo os mesmos critérios da planilha acima, no entanto não será apresentado por ser muito extensa

Tabela 15. Identificação dos nós e respectivos CE

Cenário A1		Cenário A2		Cenário A3		SistemaB	
Nó	CE	Nó	CE	Nó	CE	Nó	CE
TODOS OS NÓS	0.00	TODOS OS NÓS	0.004	TODOS OS NÓS	0.012	2	1.0558
						3	1.0558
						7	0.0881
						8	0.0950
						179	0.0950
						180	0.0950
						181	0.0950
						184	0.0950
Sistema A		Cenário A5		Cenário A4		276	0.0881
Nó	CE	Nó	CE	Nó	CE	344	0.0881
33	0.5694	TODOS OS NÓS	0.019	TODOS OS NÓS	0.038	559	0.0881
39	0.0274					699	0.0135
41	0.0275					700	0.0135
45	0.0207					701	0.0386
46	0.0123					702	0.0386
47	0.0196					703	0.0386
53	2.9565					725	0.0386
outros	0.00					726	0.0291
Obs.: No cenário A1, A2, A3, A4 e A5 foi aplicado à todos os nós o valor do Coeficiente do Emissor (CE) indicado nas respectivas células. No Sistema A, na coluna dos Nós, onde diz outros, quer dizer, os demais nós do sistema, que tiveram seu CE = 0,00						738	0.8546
						741	0.0135
						979	0.0291
						1000	0.0950
						1004	0.0881
						1095	0.0881
						1121	0.0135

Tabela 16. Perdas reais e aparentes

	Perdas reais e aparentes						
	A	A1	A2	A3	A4	A5	B
Perdas Reais (m ³ /dia)	624.74	0.00	132.98	393.77	1186.09	624.78	2674.01
TOTAL (%)	97.65	0.00	89.86	96.33	98.75	97.65	97.15
Perdas Aparentes (m ³ /dia)	15.01	15.01	15.01	15.01	15.01	15.01	78.34
TOTAL (%)	2.35	100.00	10.14	3.67	1.25	2.35	2.85

6.7 Cálculo dos indicadores de desempenho energético

A Tabela 17 apresentada abaixo contempla os resultados obtidos para os indicadores de eficiência energética propostos neste estudo.

Tabela 17. Resultados finais dos indicadores

Variáveis e Índices	Cenário	A1	A2	A3	A5	A	A4	B
P_{min} (m)		10	10	10	10	10	10	10
Perdas Reais (m³/h)		0.00	5.54	16.41	26.03	26.03	49.42	111.42
y (N/m³)		9800	9800	9800	9800	9800	9800	9800
Q_{faturada} (m³/h)		17.53	17.53	17.53	17.53	17.53	17.53	41.90
Q_{fornecida} (m³/h)		18.22	23.70	34.56	44.19	44.19	67.58	156.59
H (m)		618.13	618.13	618.13	618.13	618.13	618.13	703.9
P_{min} (kW)		29.61	29.61	29.61	29.61	29.61	29.61	77.59
E1 - Energia em Excesso por Volume de Água entrada no Sistema - (kWh/m³)		0.057	0.433	0.826	1.013	1.013	1.245	1.421
E2 - Energia em Excesso por Volume de Água Faturada - (kWh/m³)		0.059	0.586	1.629	2.552	2.552	4.797	5.309
E3 - Economia de Energia em Excesso (adimensional)		1.035	1.347	1.964	2.511	2.511	3.840	3.867
E4 - Energia em Excesso por Volume de Água Perdida Real - (kWh/m³)		—	1.853	1.740	1.719	1.719	1.702	1.997
kwh/ano		9128.0	89941.9	250110.4	391993.6	391971.4	736740.6	1948731.6
R\$/ano (R\$ 0.43/kWh)		3925.0	38675.0	107547.5	168557.2	168547.7	316798.5	837954.6

7 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Em um sistema de abastecimento quanto maiores as perdas maior deverá ser a vazão fornecida para suprir a demanda dos nós, elevando desta forma a potência fornecida ao sistema. Como a estrutura física não se altera como diâmetros, rugosidade e cotas, a potência mínima continuará constante.

Interessante notar que o aumento da potência fornecida é proporcional às perdas reais, conforme mostra a Tabela 18, que traz ainda a potência mínima exigida pelos sistemas e os cenários.

Tabela 18. Cenários e as potências correspondentes.

Cenário	Potência Mínima (W)	Perdas Reais (m ³ /h)	Potência Fornecida (W)	Vazão Fornecida (m ³ /h)
A1	29609.82613	0	30651.83044	18.216
A2	29609.82613	5.541	39877.16314	23.6985
A3	29609.82613	16.407	58161.24249	34.5645
A	29609.82613	26.031	74355.42432	44.1885
A5	29609.82613	26.0325	74357.94835	44.19
A4	29609.82613	49.4205	113712.6371	67.578
B	77585.8846	111.417	300043.8274	156.585

Quando avaliamos a potência fornecida e mínima do sistema A e os cenários A1, A2, A3, A4 e A5 e as perdas reais decorrentes, obtemos a Figura 10.

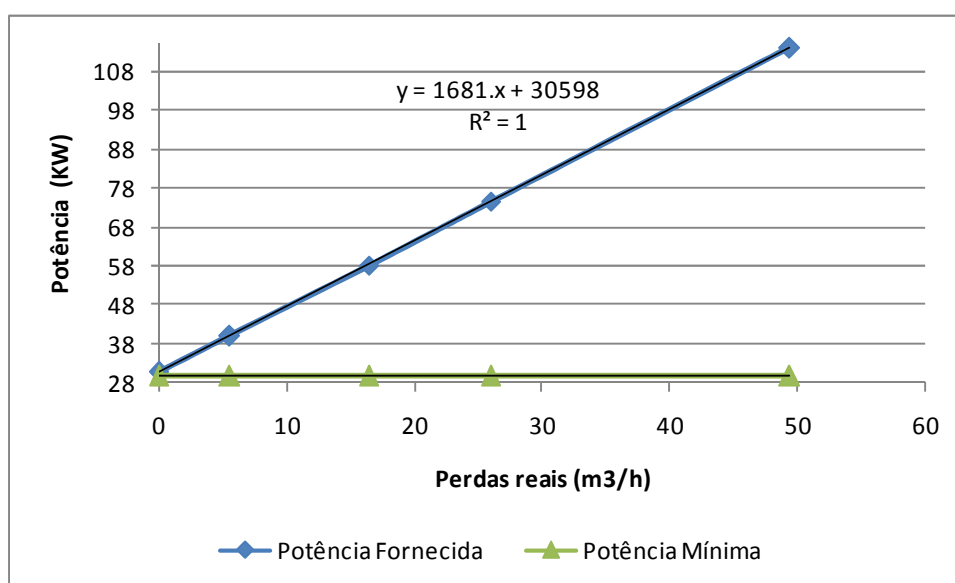


Figura 10. Aumento linear da potência fornecida

Esta linearidade se justifica pelo fato de que o aumento da potência fornecida se deve unicamente às perdas reais que ocorreram no sistema e nos cenários.

Com base nos resultados da Tabela 17, temos as seguintes conclusões a respeito do indicador E1:

a) O valor de E1 aumentou linearmente com o aumento das perdas totais como mostra a Figura 11. Assim, o indicador é válido para avaliarmos a energia em

excesso no sistema em função das perdas reais que ocorrem nos cenários, sendo que quanto menor este indicador, melhor é a eficiência energética.

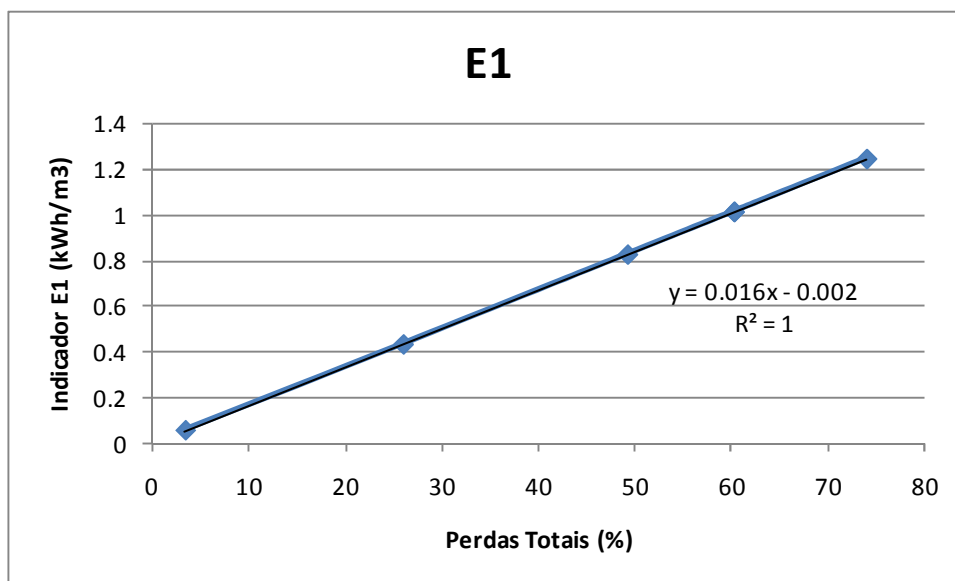


Figura 11. Aumento linear do indicador E1 em função das perdas totais

b) Comparando os dois sistemas, A e B na Tabela 17, verificamos que o sistema A apresenta menos energia em excesso no sistema por volume de água fornecida do que o sistema B, sendo desta forma mais eficiente energeticamente.

O indicador E2 mostrou-se eficiente na comparação de cenários, bem como de sistemas, assumindo valores tanto menores quanto melhor a eficiência energética, ou seja, quanto maiores as perdas, maior será a energia em excesso por volume de água faturada.

A Figura 11 mostra a evolução do indicador conforme aumenta o percentual de perdas de água no sistema.

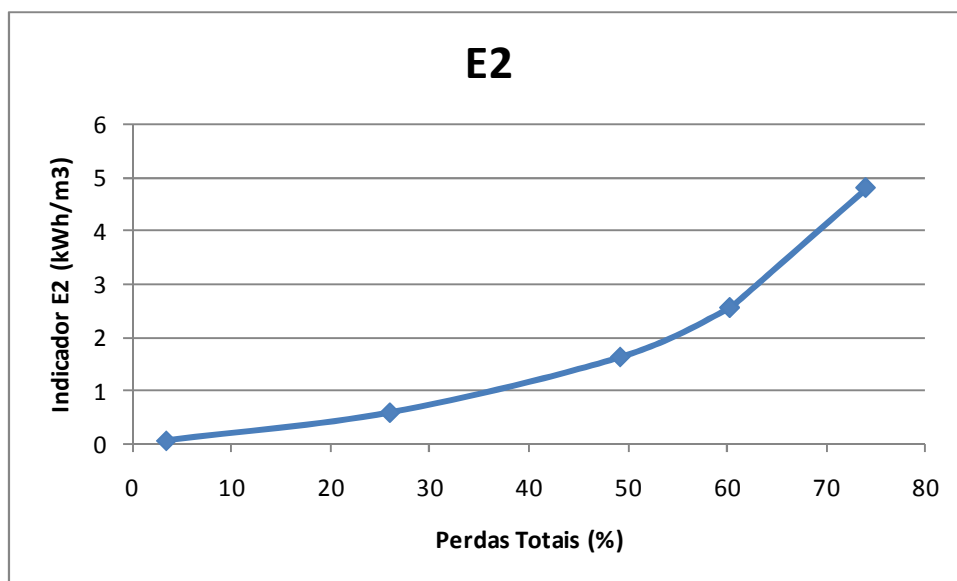


Figura 12. Aumento do indicador E2 com o aumento das perdas totais

O terceiro índice que representa a relação da energia fornecida pela energia mínima, quantificou o excesso teórico de energia fornecido ao sistema.

Apresentou um comportamento semelhante ao indicador A2, variando dentro de um mesmo sistema, quando variamos as perdas totais. A situação pode ser mais bem compreendida quando analisamos a equação do indicador e suas variáveis.

$$E3 = \frac{P_{forn}}{P_{min}} \quad \text{Equação 24}$$

Como E3 é a relação da Potência fornecida pela Potência mínima e apenas a potência fornecida cresceu como mostrou a Figura 10, obtivemos assim o crescimento deste indicador conforme aumentaram as perdas.

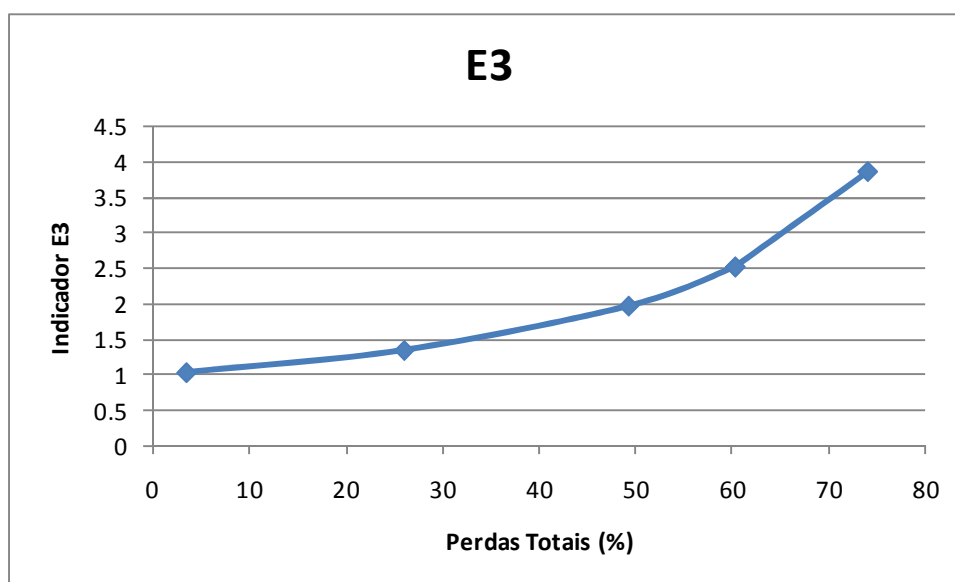


Figura 13. Evolução do indicador E3 com o aumento das perdas

Este índice foi ajustado para uma forma percentual, trazendo melhor compreensão. Obtivemos o seguinte:

$$E3 = \left(\frac{P_{forn} - P_{min}}{P_{min}} \right) * 100 = \left(\frac{P_{forn}}{P_{min}} - 1 \right) * 100 \quad \text{Equação 25}$$

Desta forma obtivemos os seguintes percentuais de energia em excesso: 3,5% para o cenário A1, 34,7% para o cenário A2, 96,4% no cenário A3, 284% para o cenário A4 e 151,1% no cenário A5. Para os sistemas reais A e B, o excesso de energia foi de 151,1 e 99,7%, respectivamente.

O quarto índice, E4, diz que quanto menor for seu valor, menor é a eficiência energética.

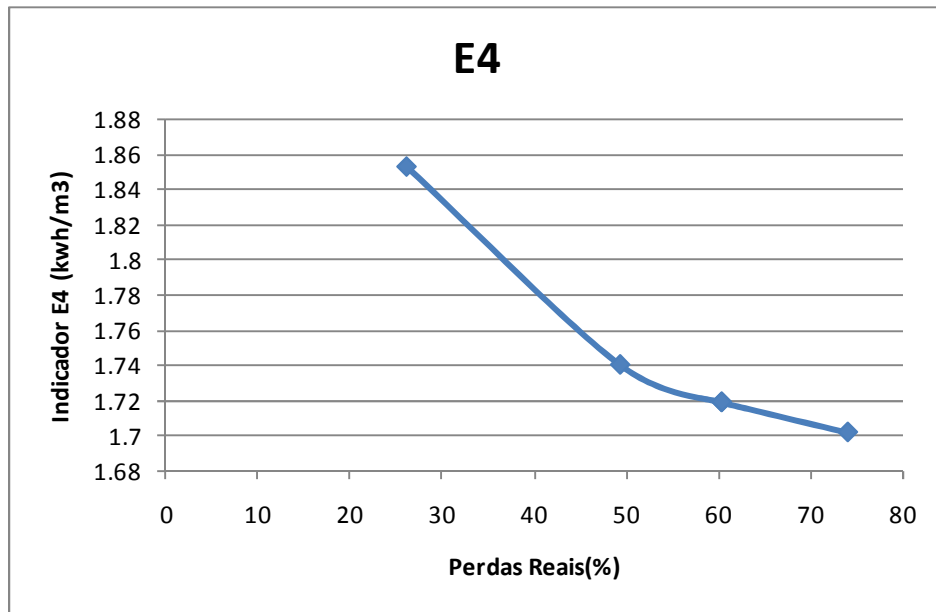


Figura 14. Evolução do Indicador E4 com aumento das perdas reais

Assim é possível verificar por este indicador a influência das perdas reais na economia de energia, visto que a medida que as perdas aumentam, este índice tem seu valor reduzido, o que indica queda na eficiência.

No entanto este indicador se restringe à avaliação das consequências do controle das perdas reais no sistema. Tanto é que para o caso de uma redução nas perdas aparentes, teríamos um aumento no volume faturado apenas, não afetando em nada este indicador.

Além disso, como a potência mínima é constante, temos como variáveis a potência fornecida e o volume de perdas reais. Quanto maior o volume de perdas reais, maior será a vazão fornecida ao sistema, aumentando da mesma forma a potência fornecida. No entanto a variação na potência fornecida é menor do que a variação das perdas reais, tornando assim o indicador com valor numérico menor, mostrando uma menor eficiência energética.

Muitas vezes, o indicador por si só não permite uma visualização em termos econômicos de possíveis intervenções no sistema. Para isso foi elaborado o cálculo do montante pecuniário economizado com uma redução de 50% nas energias em excesso.

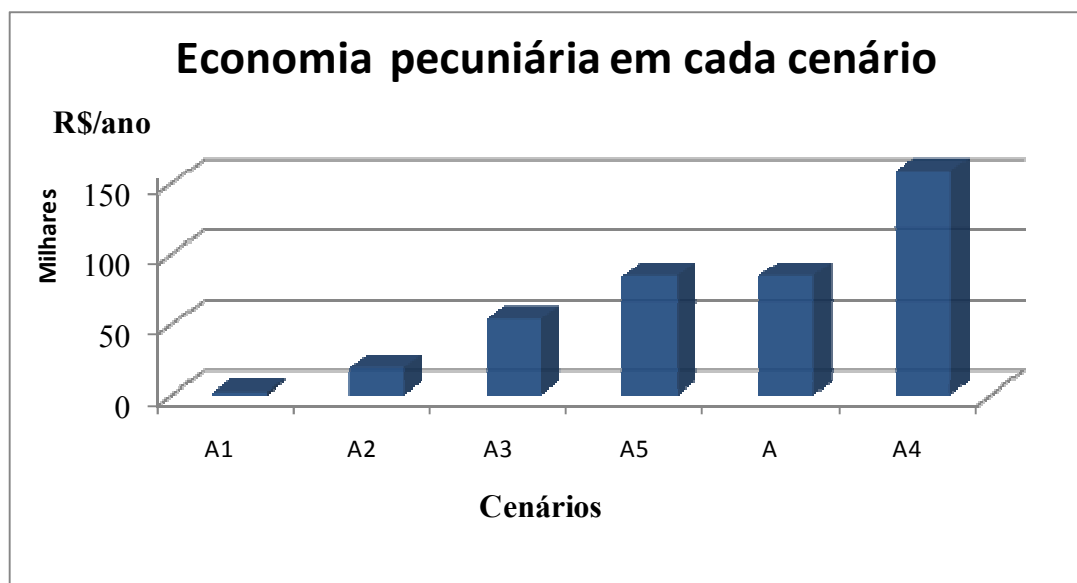


Figura 15. Economia pecuniária em cada cenário

Para o sistema A que atende uma população aproximada de 2800 habitantes, e considerando a tarifa de energia elétrica média paga pelas concessionárias de R\$ 0,43 por KWh, segundo o SNIS 2006, uma economia de R\$84.000,00 aproximadamente, por ano, é com certeza um montante apreciável, e que com certeza daria uma estabilidade econômica à concessionária.

Para se chegar a tais reduções no desperdício de energia, podemos citar algumas intervenções possíveis de serem feitas. No entanto um balanço deve ser feito para analisar se tais intervenções terão o custo-benefício positivo.

- a) Redução nas perdas reais, que reduziria a Q_{forn} ;
- b) Redução nas perdas aparentes, que aumentaria a Q_{fat} ;
- c) Implantar um reservatório adicional em cota intermediária, de modo a reduzir o volume recalado para o reservatório disposto em cota mais elevada, além de reduzir o excesso de potência nos nós com cotas menores.

A determinação dos indicadores E1 e E2 já se mostra suficiente para uma avaliação da eficiência energética dos sistemas, visto considerar nestes dois indicadores, tanto a vazão que é fornecida no sistema, que de forma indireta corresponde as vazão consumidas no sistema pelas perdas, e também representa a eficiência em termos de faturamento do sistema, por considerar no indicador E2 as vazões faturadas.

8 BIBLIOGRAFIA

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução nº 456 de 29 de novembro de 2000. Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT- NBR 12.218/1994- Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público.
- COLOMBO F. Calibração de Modelos Hidráulicos de Redes de Abastecimento de Água de Sistemas Reais Admitindo Vazamentos. (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2007. 200 p.
- DUARTE P., ALEGRE H., COVAS, D.I.C., (2008). Avaliação do Desempenho Energético em Sistemas de Abastecimento de Água. Artigo à ser apresentado no VIII Seminário Ibero-americano.
- GUMIER, Carlos César E. L. J. Aplicação de Modelo de Simulação-Otimização na Gestão de Perda de Água em Sistemas de Abastecimento. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.12, jan/mar 2007 p.32-41. 2006.
- HERPETZ, P. *Basics of Maintenance*. Encontro Técnico SABESP, São Paulo, 2003
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2000)
- ITONAGA, L. C. H. (2005). Estudo da Aplicação de Modelos de Redes de Água no Controle de Perdas em Casos Reais. Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM –80/2005, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 201 p.
- LAMBERT, A; Bessey, S. G. Managing Leakage- Using Night Flow Data (Report F). Engineering and Operations Committee, U. K. Water Industry. 1994.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES. Plano Nacional de Combate ao Desperdício de Água (PNCDA)- Medidas de Redução de Perdas e Elementos para Planejamento. M. Cidades: 31 p. 1999, disponível em <http://www2.cidades.gov.br/pncda/default.asp?Link=Dtas>

MINISTÉRIO DAS CIDADES. SNSA (2004a), Documento Técnico de Apoio A2: Medidas de Redução de Perdas e Elementos para Planejamento. disponível no sítio http://www2.cidades.gov.br/pncda/Dtas/Arq/DTA_A2.pdf

MINISTÉRIO DAS CIDADES. SNSA (2004b) Documento Técnico de Apoio C3: Medidas de Redução de Perdas e Elementos para Planejamento. disponível no sítio http://www2.cidades.gov.br/pncda/Dtas/Arq/DTA_C3.pdf

MIRANDA, E.C. (2002). Avaliação de Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água - Indicadores de Perdas e Metodologias para Análise de Confiabilidade. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental: Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-57/2002, Brasília, 200 p.

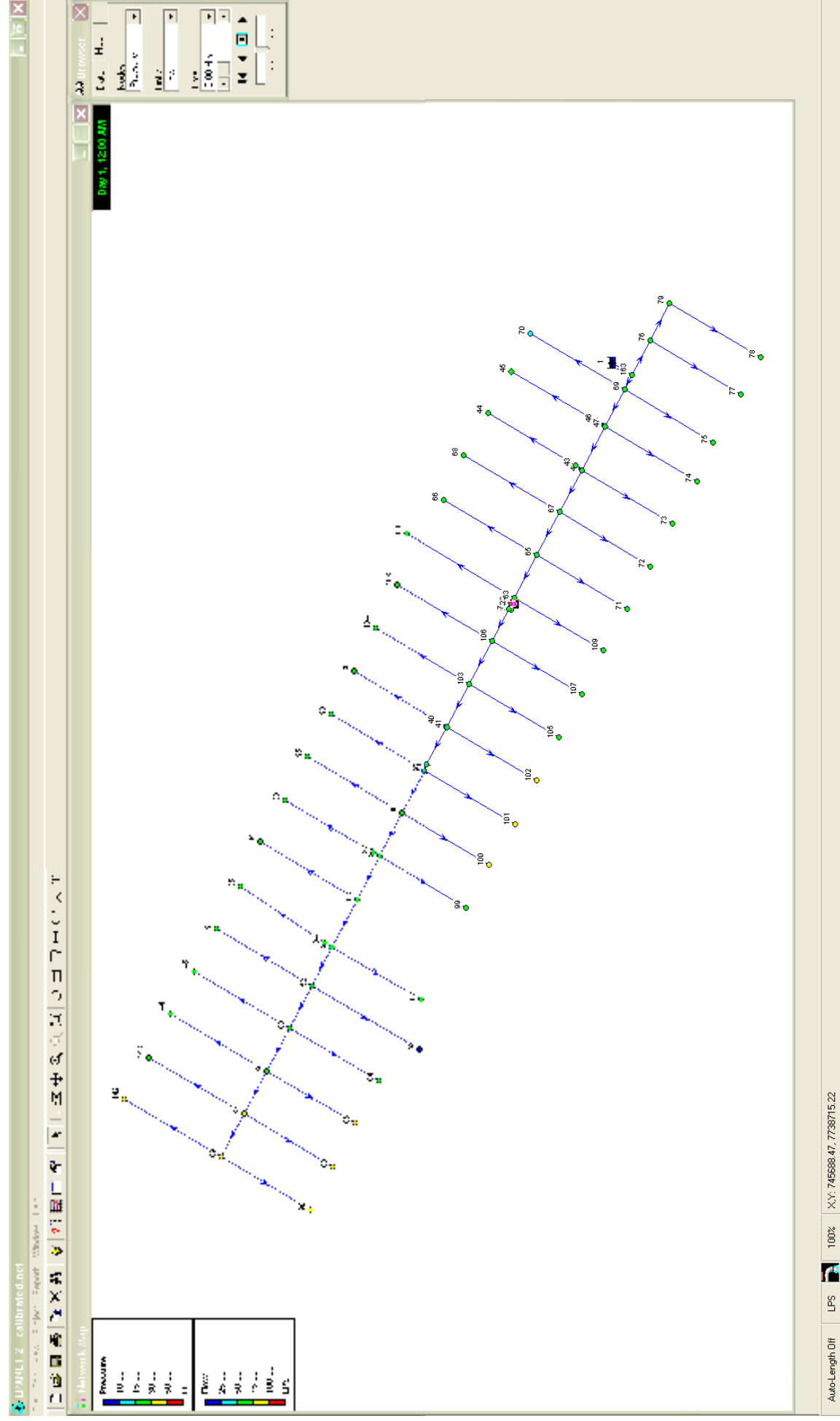
OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS)- Disponível em <http://www.ons.org.br/home/>

PNCDA. Plano Nacional de Combate ao Desperdício de Água-Medidas de Redução de Perdas e Elementos para Planejamento. M. Cidades: 31 p. 1999, disponível em <http://www2.cidades.gov.br/pncda/default.asp?Link=Dtas>

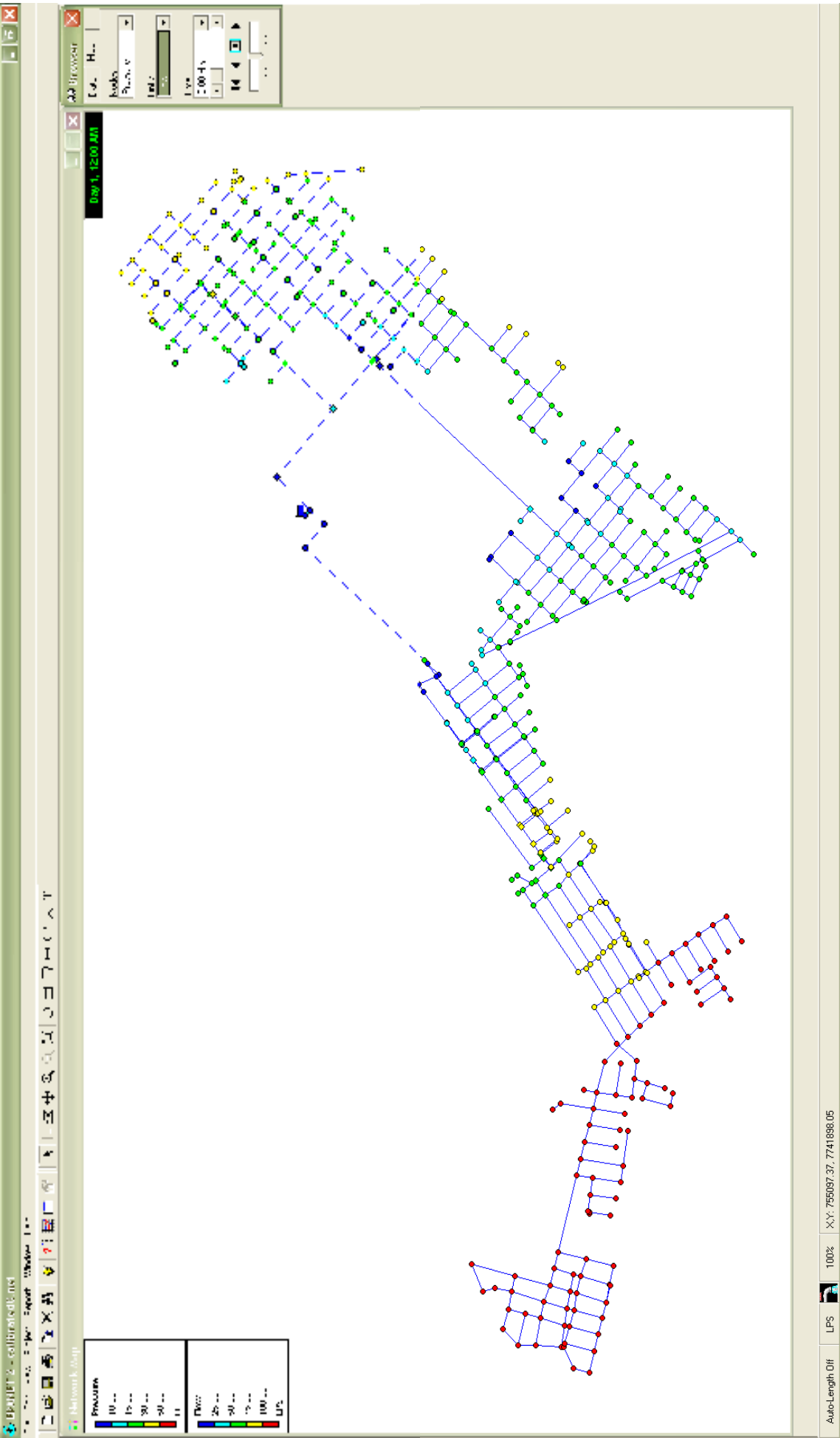
ROSSMAN, L.A. (2000). *EPANET 2 user's manual*. U.S Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2000.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Indicadores Operacionais- Água e Esgoto. M. Cidades 2006

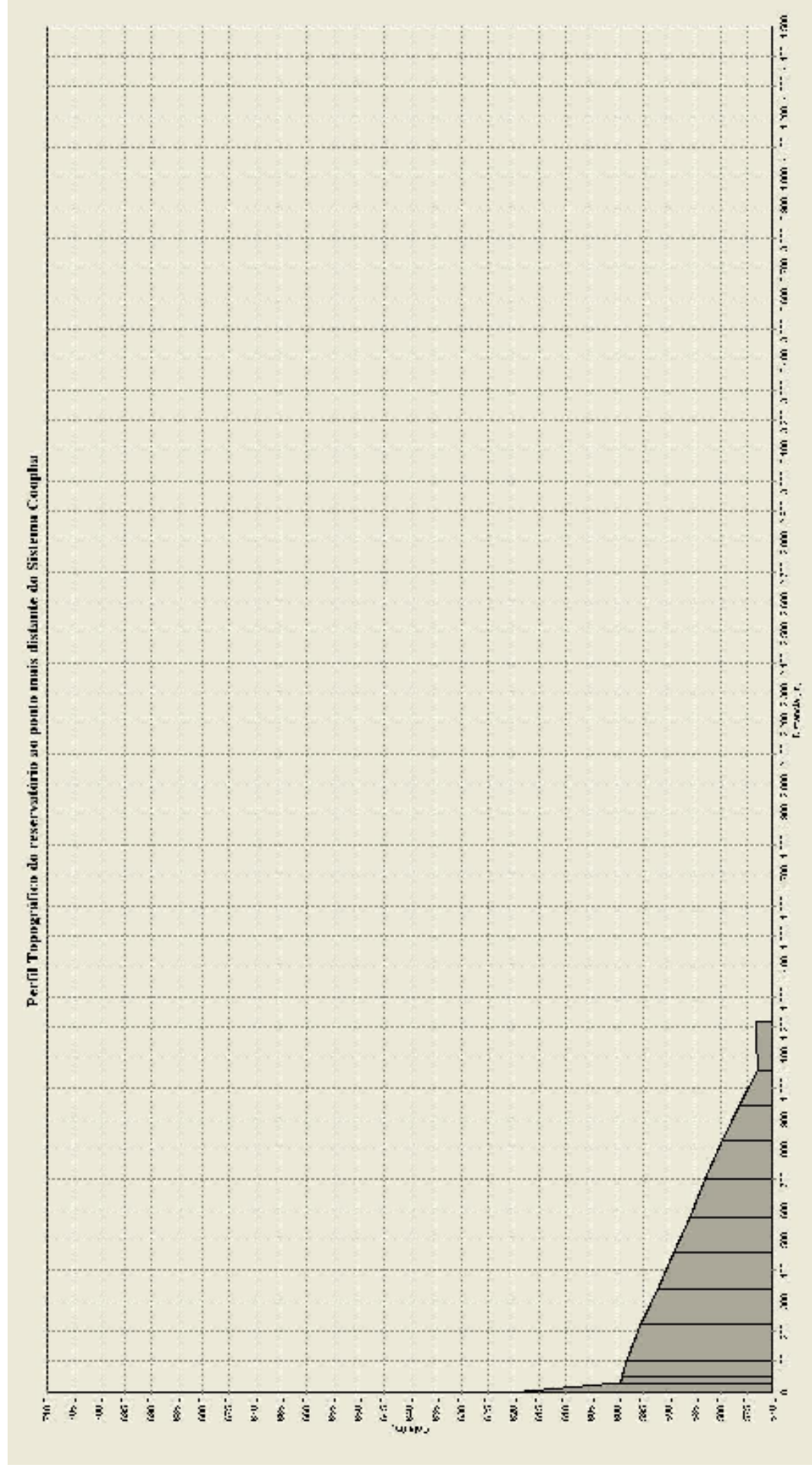
SOARES, A. K. Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no Escoamento Transitório. (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2007. 332 p.



Anexo 2. Sistema B



Anexo 3. Perfil topográfico do sistema de abastecimento de água A



Anexo 4. Perfil topográfico do sistema de abastecimento de água B

